

Centre Spatial de Liège

Imagerie Terahertz pour l'inspection des composites

Dr. Marc GEORGES, Yuchen ZHAO

Labo Laser et Contrôle Non Destructif

Résumé

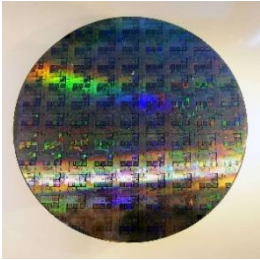
- Les matériaux en Terahertz
- Historique
- Projet emblématique : DOTNAC
 - Technique TDS
 - Technique FMCW “RADAR Terahertz”
 - Résultats
 - Application industrielle
- Systèmes à l'état de l'art
- Imagerie Terahertz
- Holographie Terahertz

Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ Comportement des matériaux en Terahertz

Bonne transmission

Silicium



Céramiques



(Carbure de Silicium SiC)

Fibre de verre



Mousses



(Rohacell)

Plastique, teflon,...



Adhésifs



Peinture et vernis



Réflexion

Métaux



Carbone



Fibre de Carbone



Absorption

Eau



Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ Comportement des matériaux en Terahertz

Bonne transmission

Silicium



Céramiques



Fibre de verre



Mousses



(Rohacell)

Plastique, teflon,...



Peinture et vernis



Réflexion

Métaux



Carbone



Fibre de Carbone



Eau



Fonction de la fréquence THz !!

Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ Historique

- Invention de l'imagerie THz

OPTICS LETTERS / Vol. 20, No. 16 / August 15, 1995

Imaging with terahertz waves

B. B. Hu and M. C. Nuss

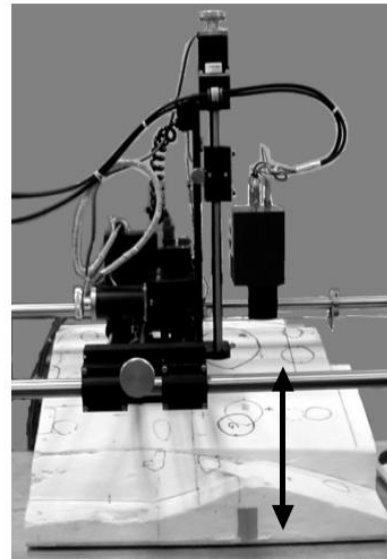
AT&T Bell Laboratories, 101 Crawfords Corner Road, Holmdel, New Jersey 07733-3030

Received May 11, 1995

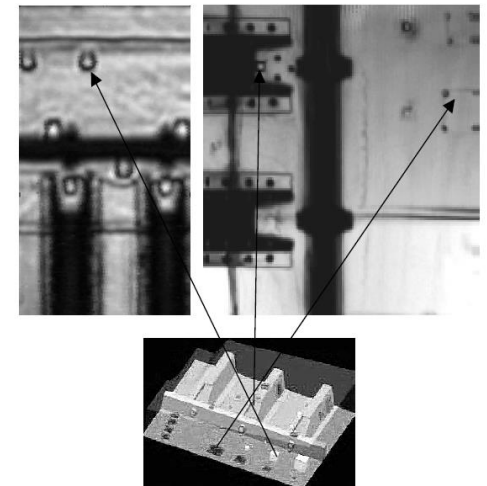
We present what is to our knowledge the first imaging system based on optoelectronic terahertz time-domain spectroscopy. Terahertz time-domain waveforms are downconverted from the terahertz to the kilohertz frequency range, and the waveform for each pixel is frequency analyzed in real time with a digital signal processor to extract compositional information at that point. We demonstrate applications to package inspection and chemical content mapping in biological objects. © 1995 Optical Society of America

- Premier exemple d'inspection de matériau aérospatial

Système TDS (Picometrix)



D. Zimdars et al., *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* **24** (2004)



Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ Projet emblématique: DOTNAC



(2010-2013)

Development and

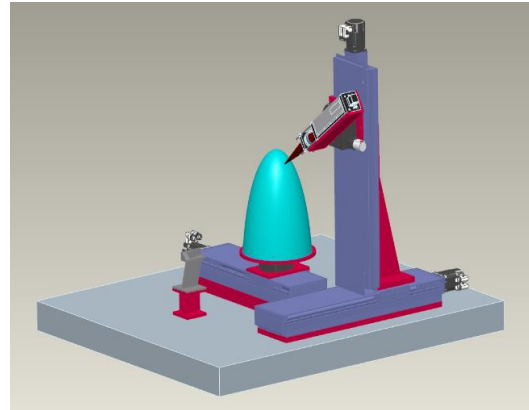
Optimization of

THz

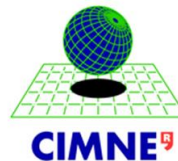
NDT on

Aeronautics

Composite Multi-layered Structure



Consortium



VERHAERT



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN

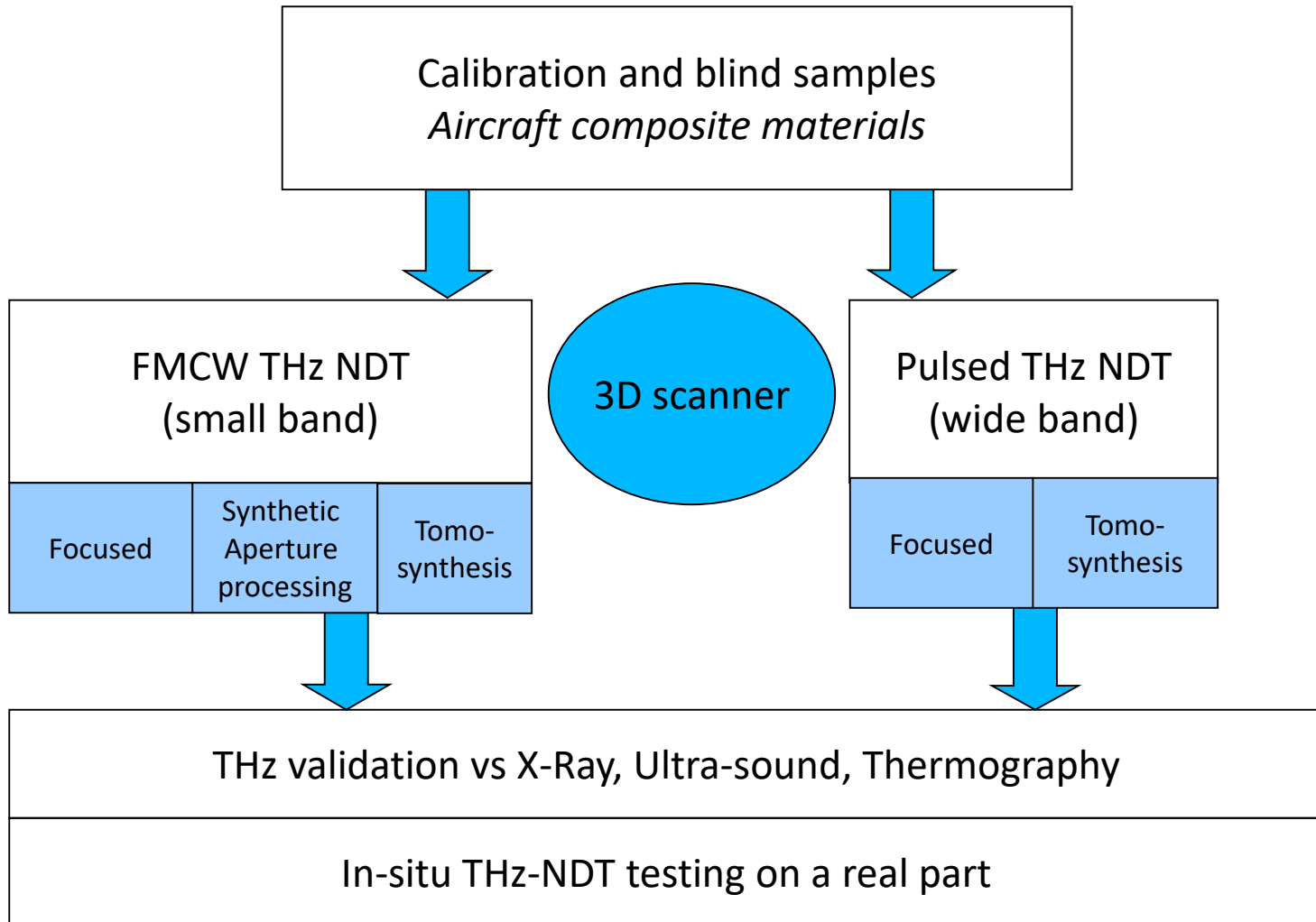
International Followers Group



(2009-2012)

Imagerie THz pour le contrôle des composites

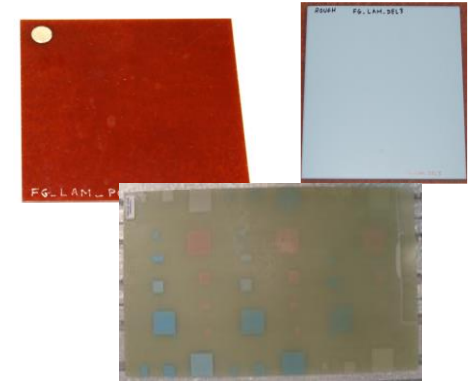
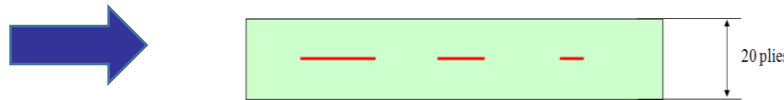
■ DOTNAC: axes de recherche



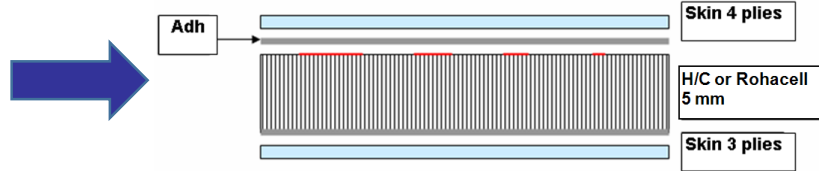
Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ DOTNAC: Echantillons d'étude

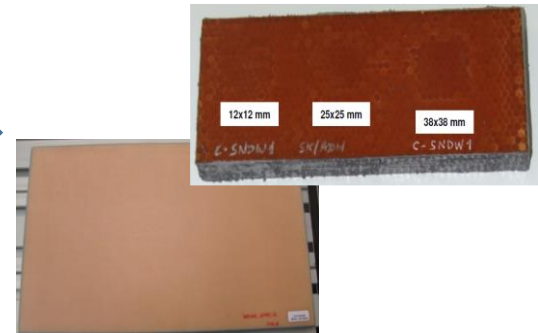
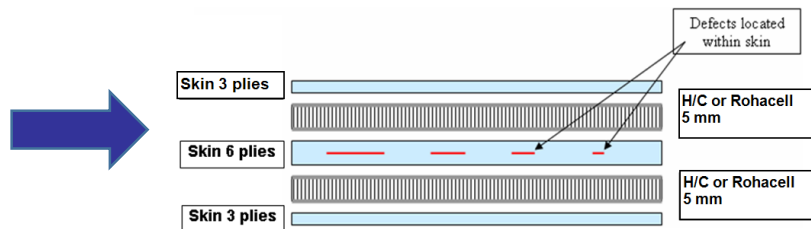
*Monolithiques
laminés*



*Structures sandwich
Type A*



*Structures sandwich
Type C*



Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ DOTNAC: Echantillons d'étude - 2



Sandwich avec inserts
Cœur: Rohacell ou NIDA



Monolithiques
avec inserts



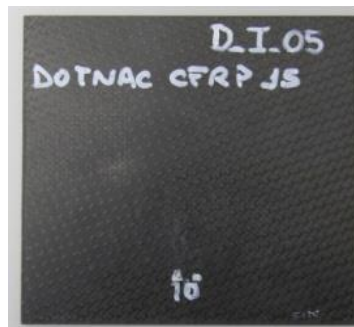
Impacts sur GFRP



Sandwich avec eau
Cœur: Rohacell ou NIDA



Impacts sur CFRP



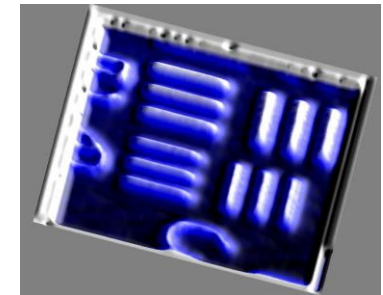
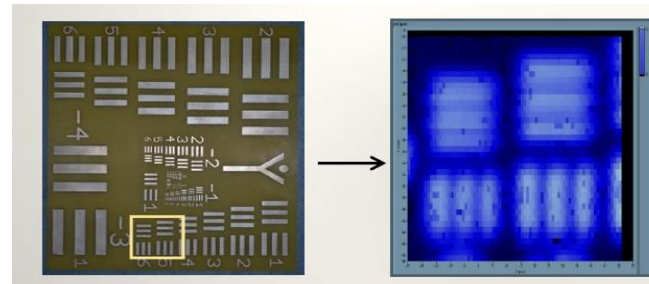
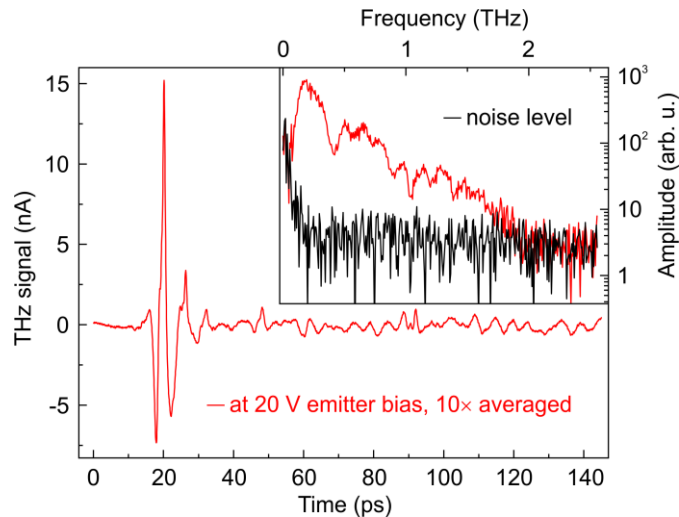
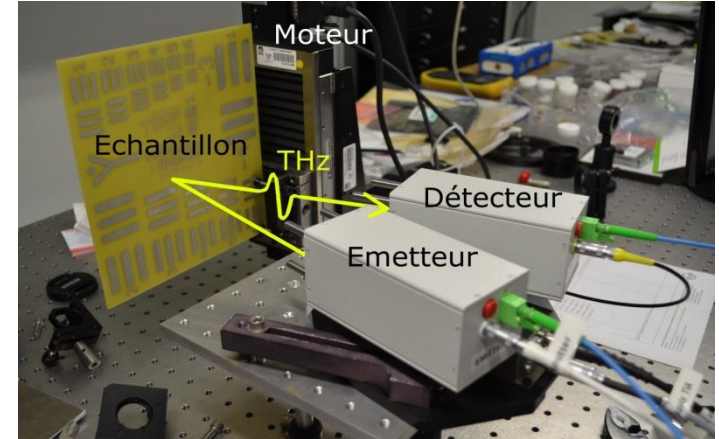
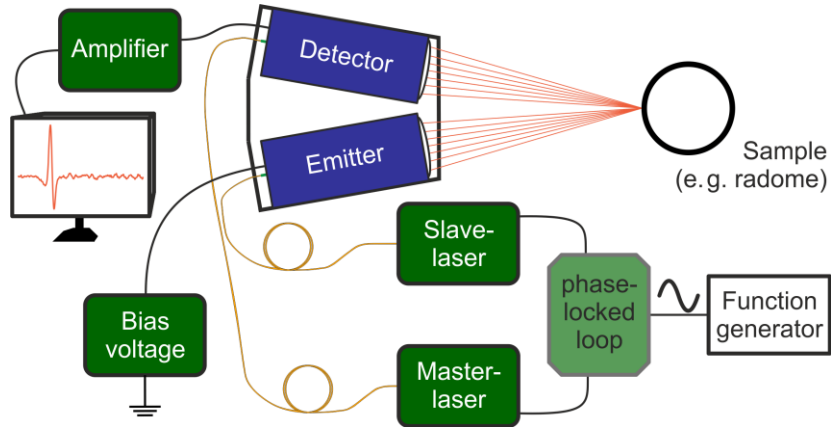
Contamination surface,
Coating avec épaisseur
incorrecte



Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ La technique TDS (Time-Domain Spectroscopy)

© université de BORDEAUX



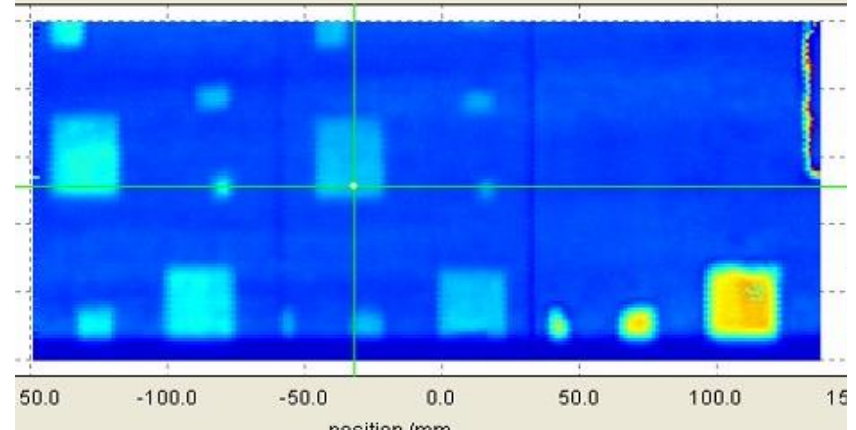
Diamètre faisceau = 1.7mm

Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ La technique TDS (Time-Domain Spectroscopy)

- Résultats sur échantillons de référence

Glass fiber sample



• Amplitude variation

steps ++

airgaps ++

(depending on distance to surface)

large polyethylen close to surface +

all other: all detected +

• Frequency evaluation:

steps and airgaps +

polyethylene and teflon +

(depending on distance to surface)

• Delay evaluation:

for all defect types +

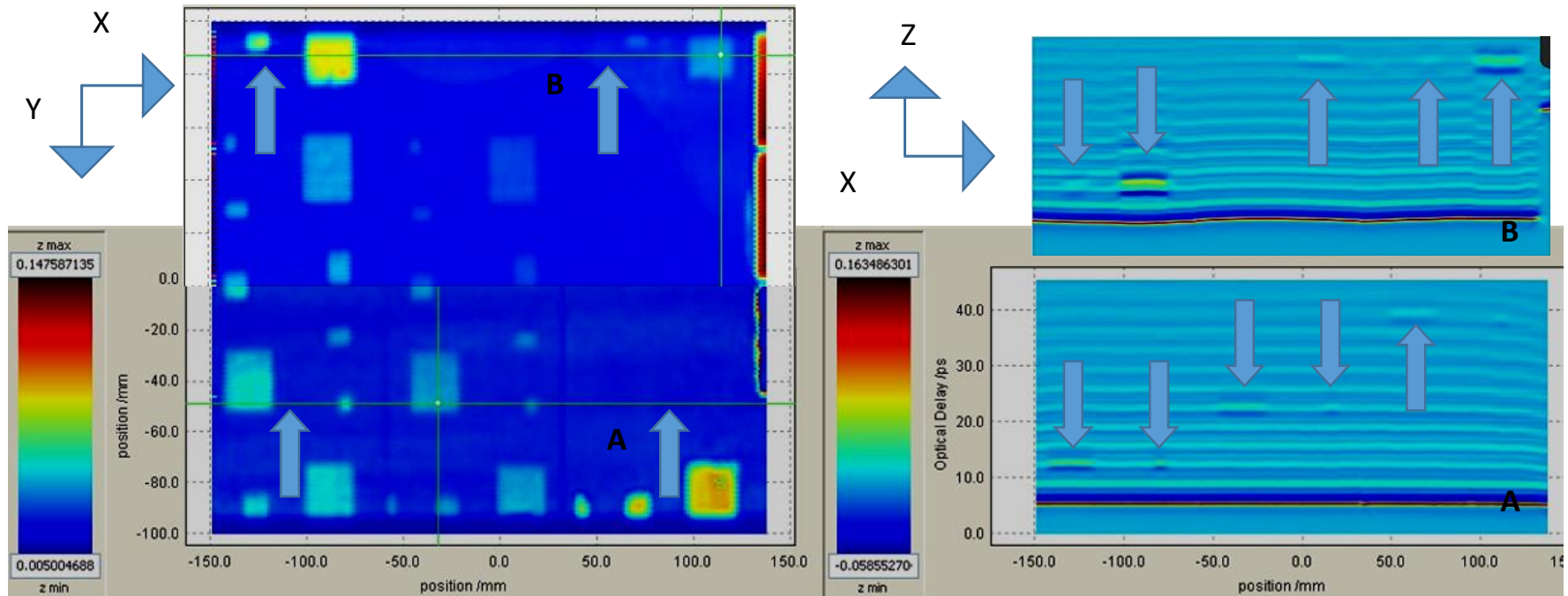
(slight scaling with depth/size)

Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ La technique TDS (Time-Domain Spectroscopy)

- Résultats sur échantillons de référence

Glass fiber sample



2D Peak to peak image

Depth cut information : plies and
defects localisation in Z direction

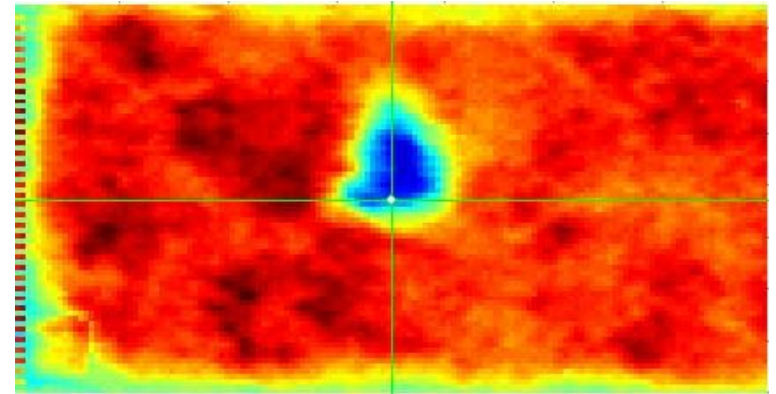
Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ La technique TDS (Time-Domain Spectroscopy)

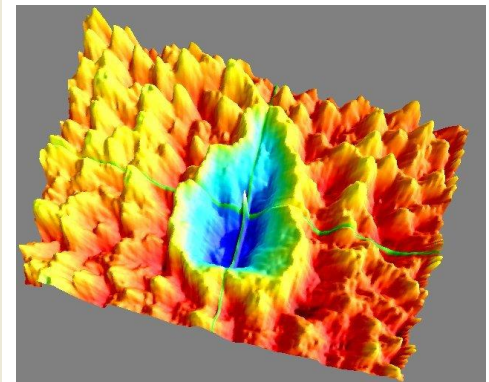
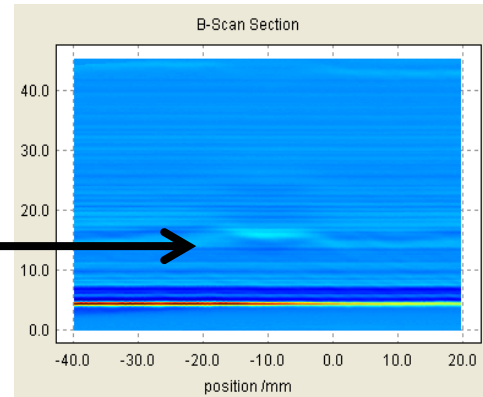
- Résultats sur échantillons de référence

Glass fiber with honeycomb core

- For the honeycomb core C-sandwiches, the water inclusions could be identified with delay and frequency evaluation,



Z localisation of water



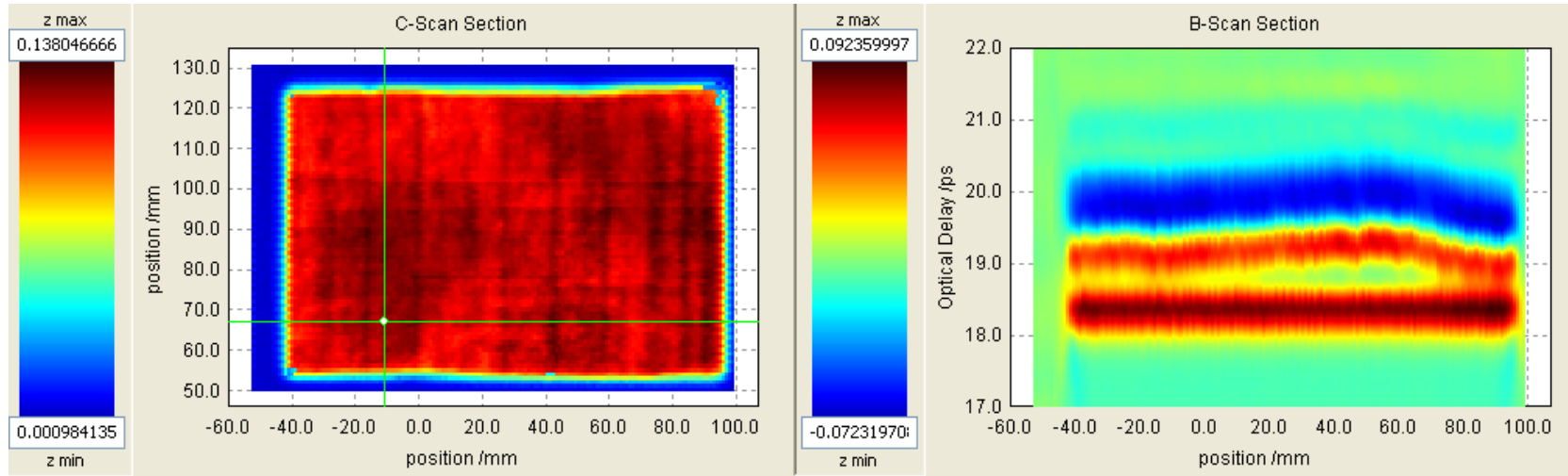
Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ La technique TDS (Time-Domain Spectroscopy)

- Résultats sur échantillons référence

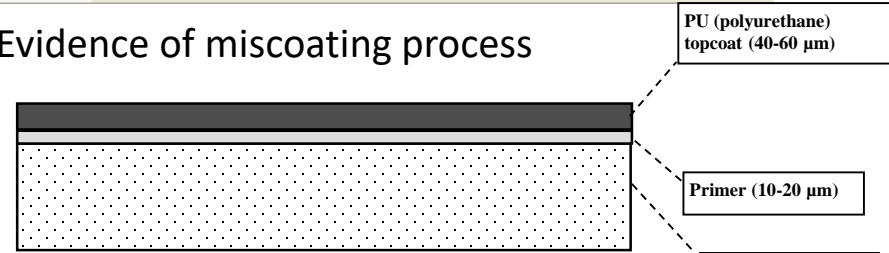
Carbon Fiber with Polyurethane layer

- The carbon fiber content of samples is too conductive to allow penetration of the surface by THz radiation
- Time delay capability allow a precise layer thickness measurement
- Time delay and frequency images show surface contamination



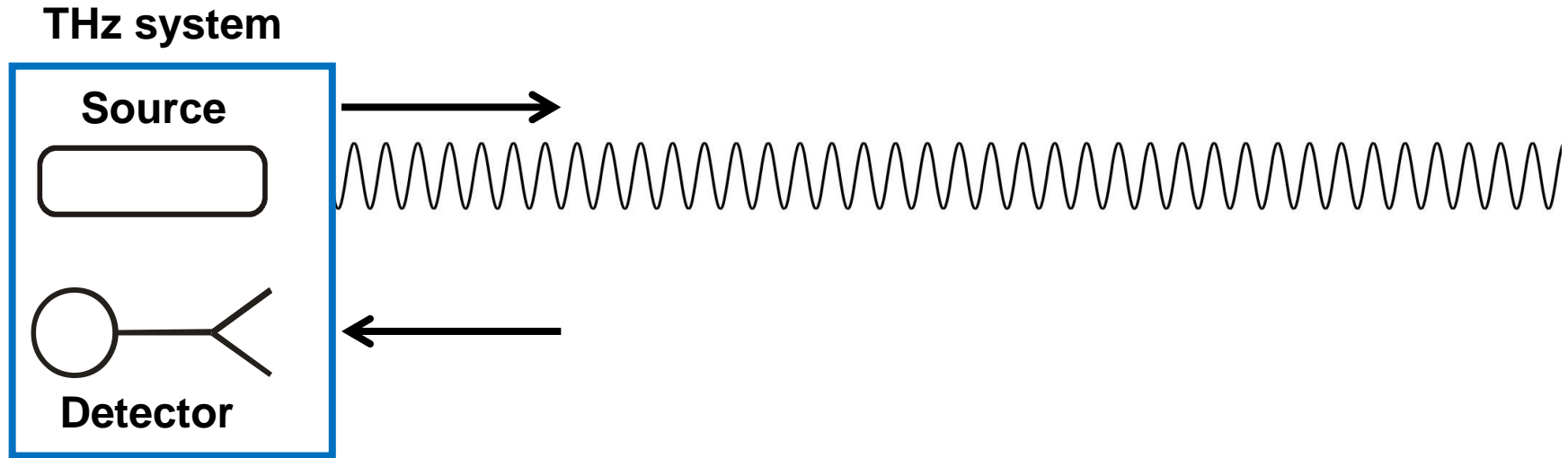
Carbon Fiber with Polyurethane layer

Evidence of miscoating process



Imagerie THz pour le contrôle des composites

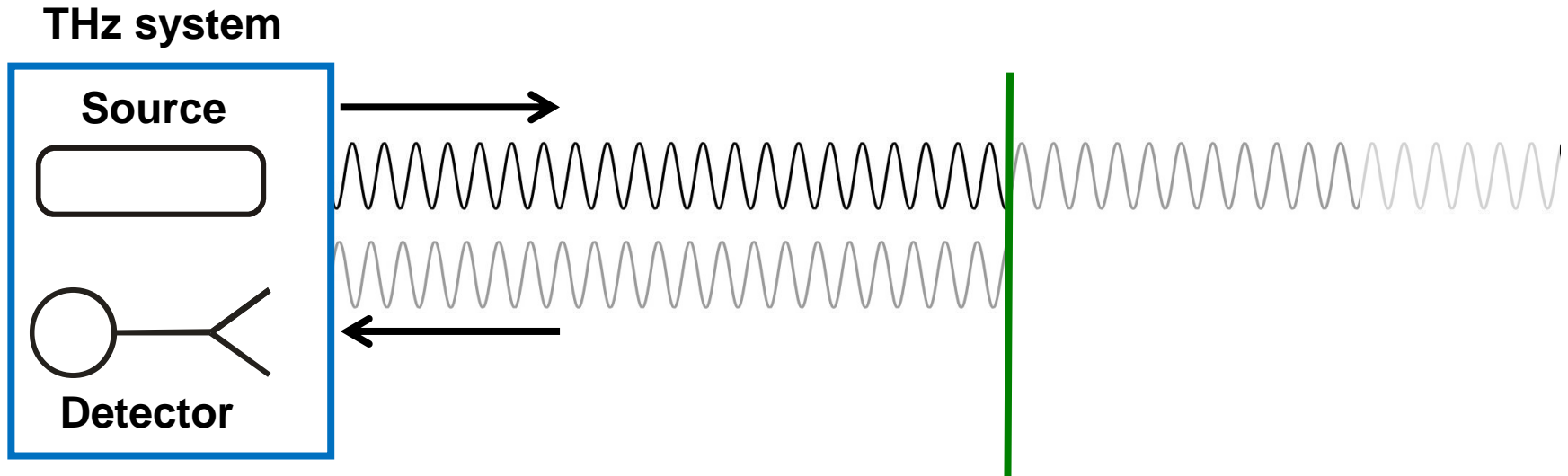
- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)



→ No signal detected

Imagerie THz pour le contrôle des composites

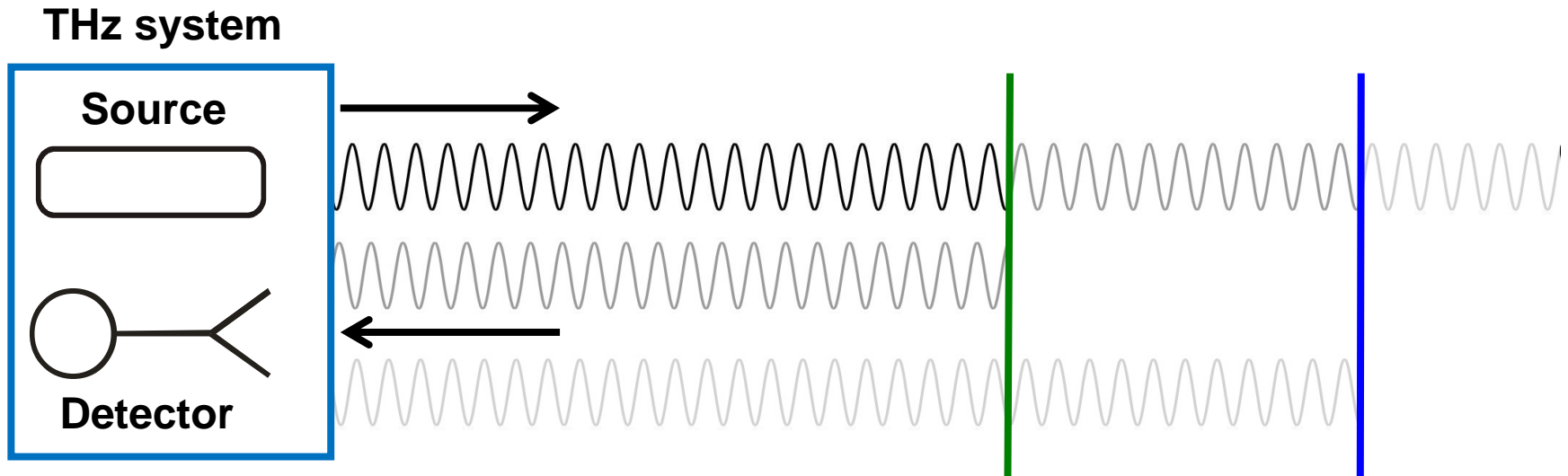
- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)



→ Reflected signal detected

Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)



→ Reflected signal detected

→ No information on distance system – reflecting objects

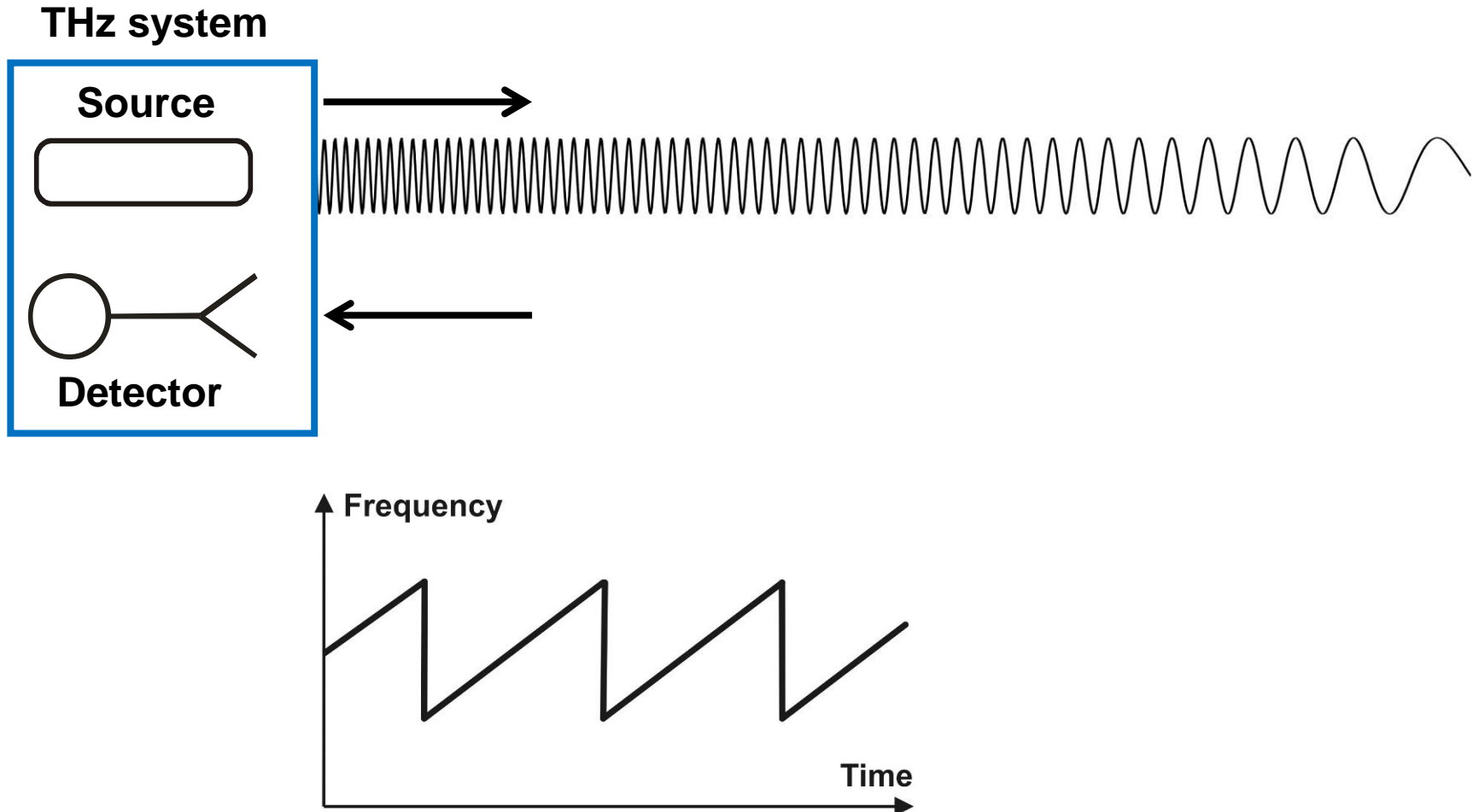
Solutions:

pulsed mode

continuous radar using frequency modulation

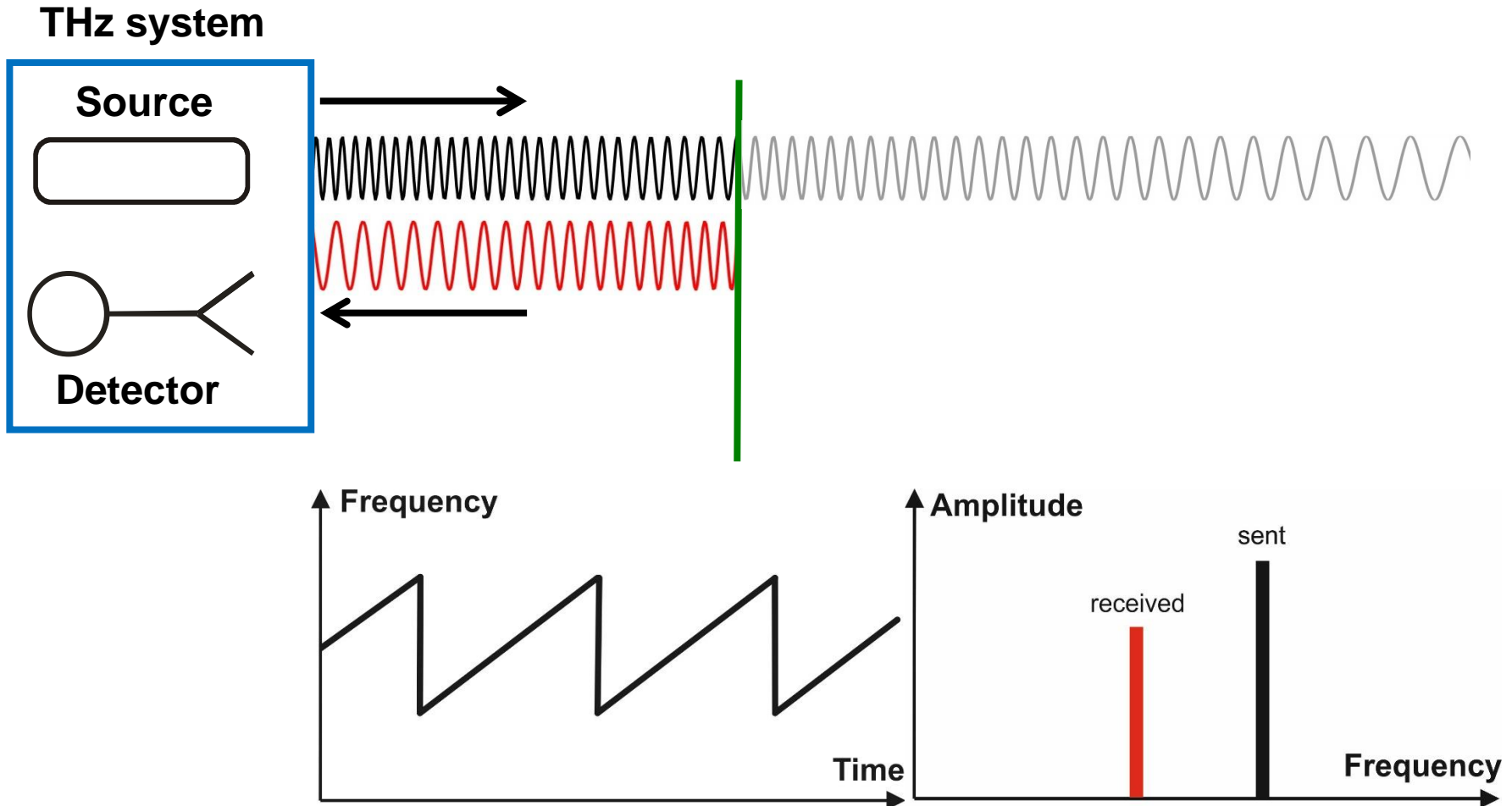
Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)



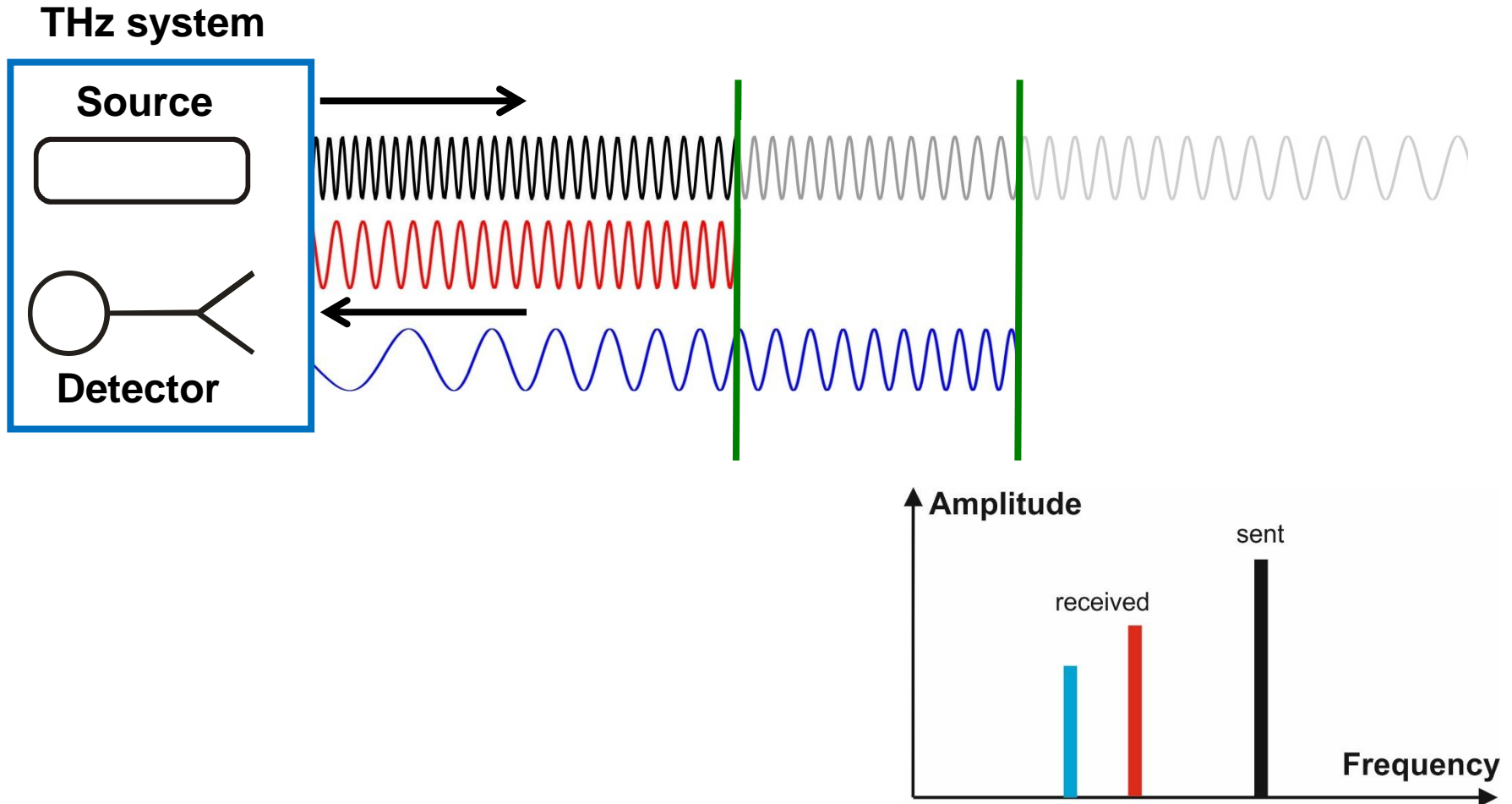
Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)



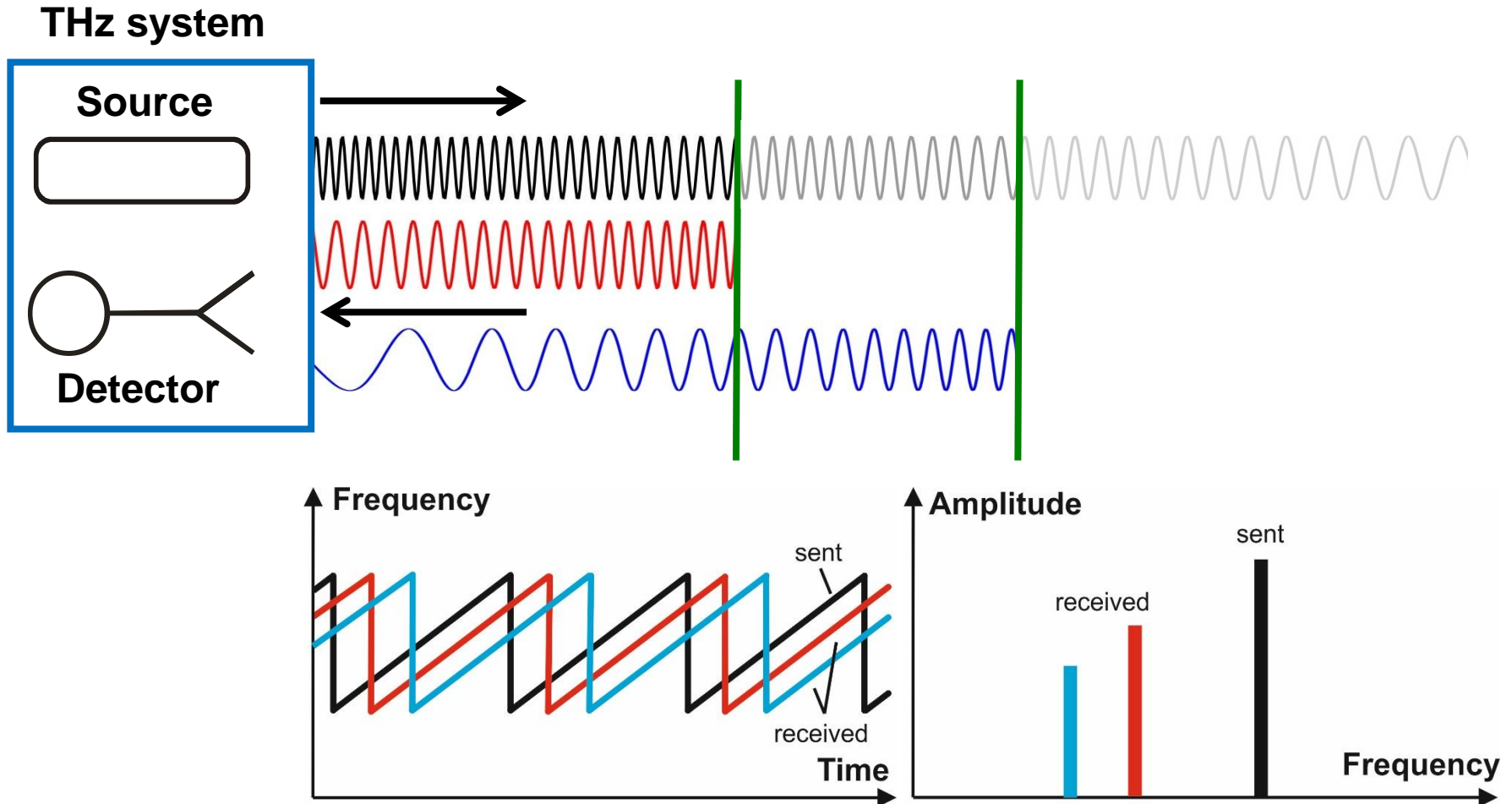
Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)



Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)



Imagerie THz pour le contrôle des composites

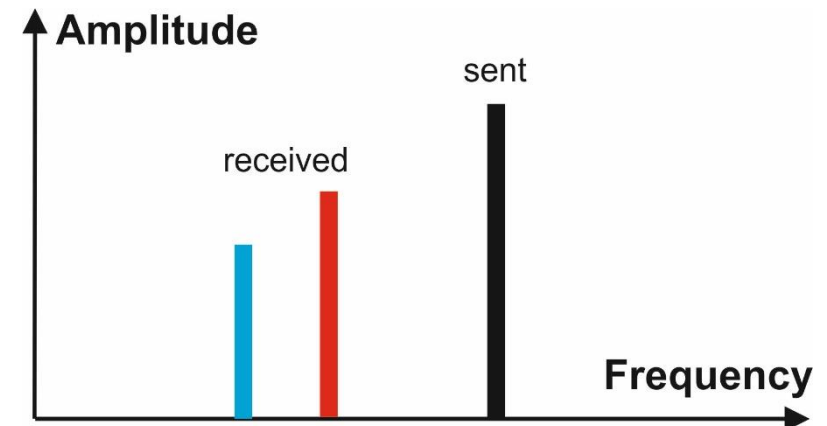
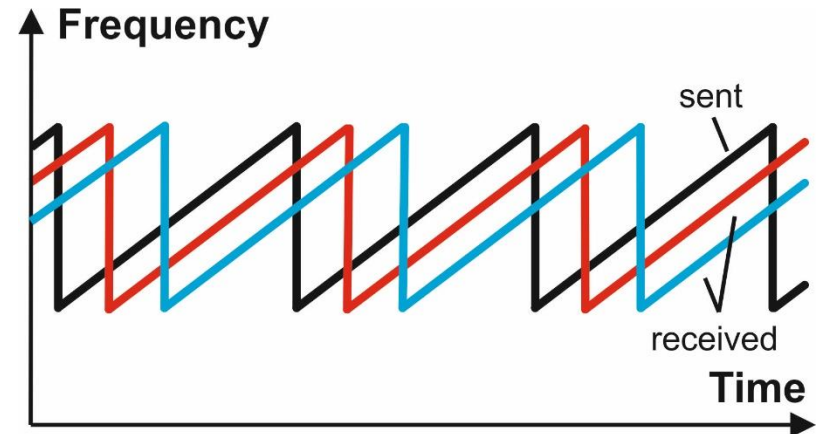
■ La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)

Variation de fréquence

- distance source-échantillon
- épaisseur de couche
- profondeur d'obstacles (défauts)

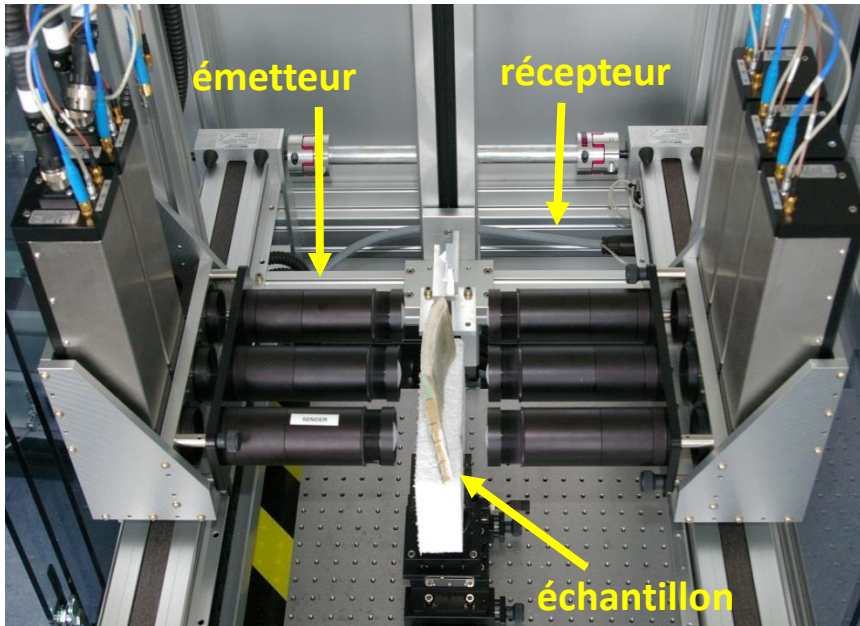
Variation d'amplitude

- absorption / diffusion
- inhomogénéité de matériau
- ...



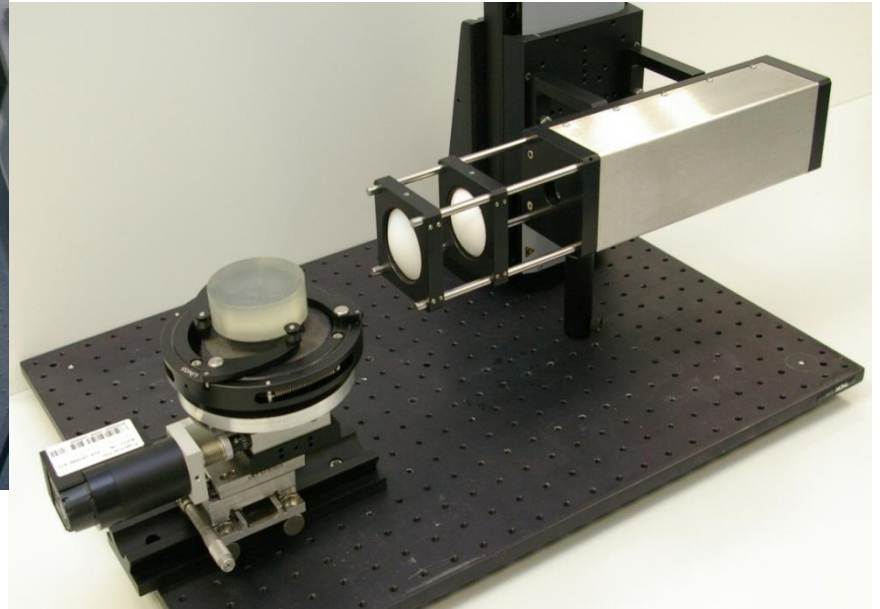
Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)
 - Systèmes en transmission et en réflexion



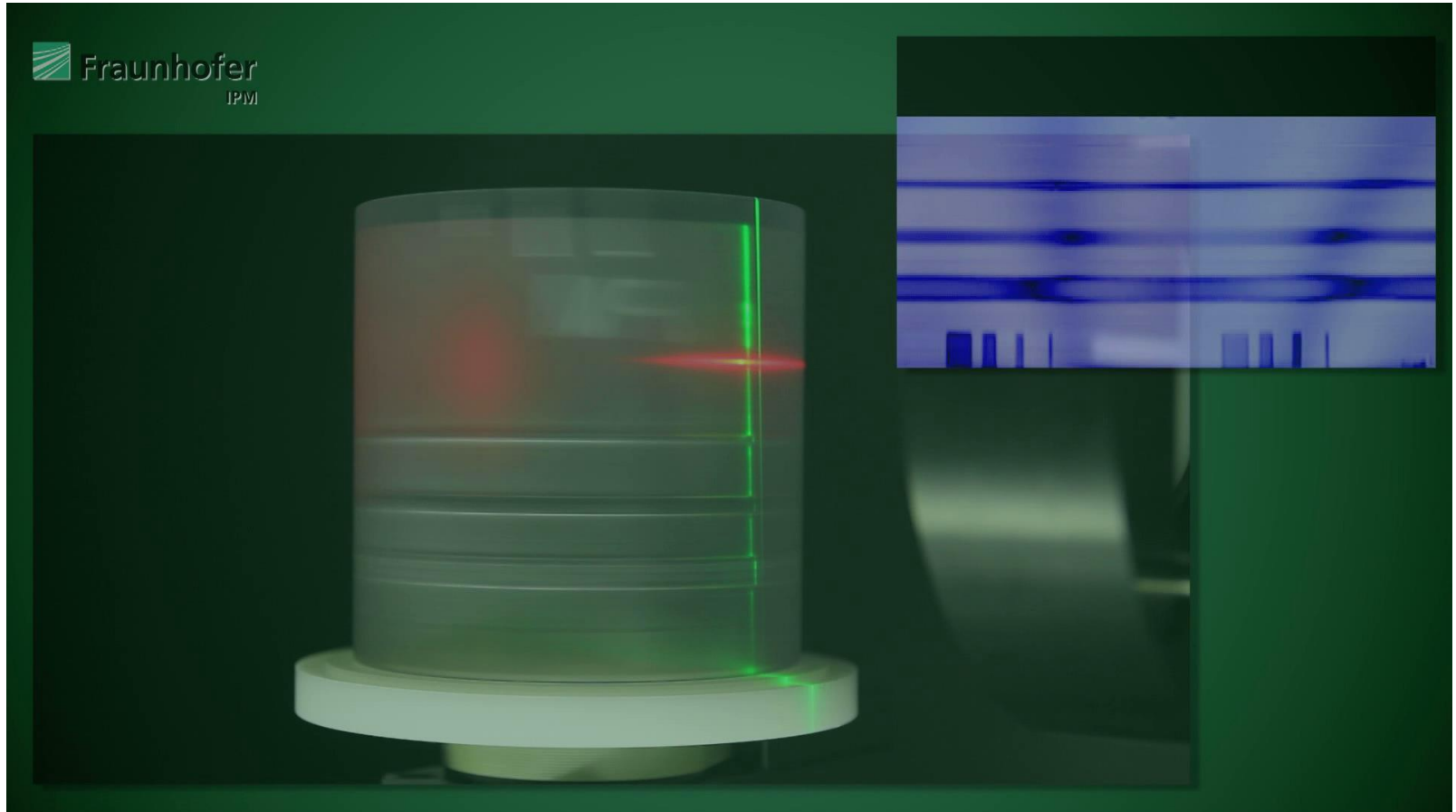
*Configuration en réflexion ou transmission
Pour échantillons plans*

*Configuration en réflexion pour
échantillons à symétrie de révolution*



Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation)



Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)

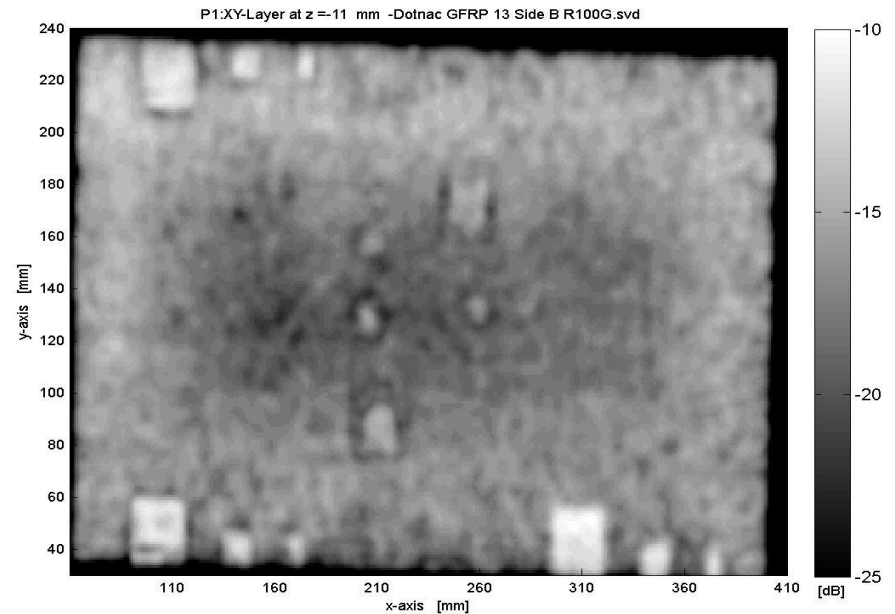
Specifications			
Technology	All electronic		
Time per Pixel	250 μ s		
Dynamic range	> 50 dB und 1:300 (< 1 s)		
Working Frequency	100 GHz	150 GHz	300 GHz
Frequency bands	60 -110 GHz	110 – 170 GHz	230-320 GHz
Lateral resolution	3 mm	2 mm	1 mm
Depth resolution	6 mm	5 mm	3 mm
Penetration depth	Few cm, material depending		

Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)
 - Exemples de résultats avec échantillons

GFRP C-SANDWICH ROHACELL WITH INSERTS

Terahertz FMCW system at 100 GHz

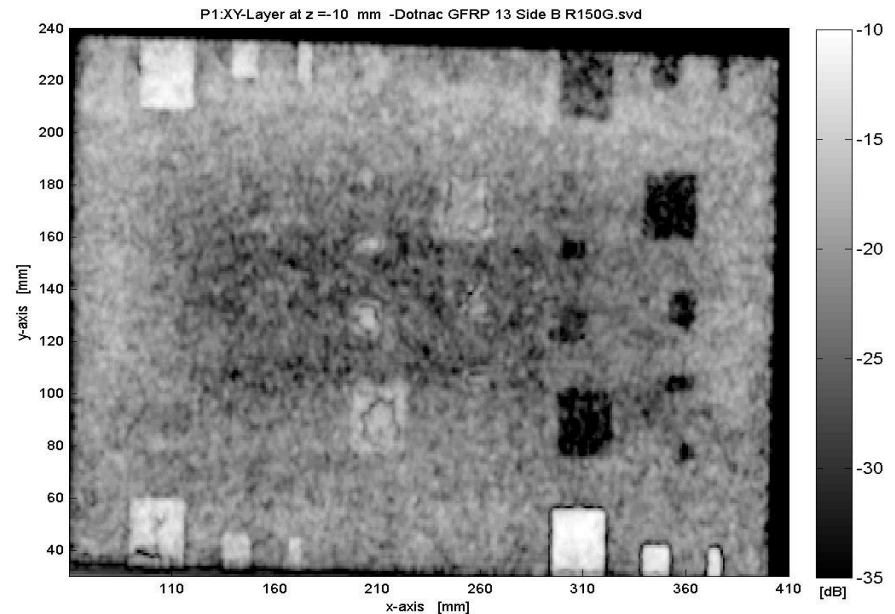


Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)
 - Exemples de résultats avec échantillons

GFRP C-SANDWICH ROHACELL WITH INSERTS

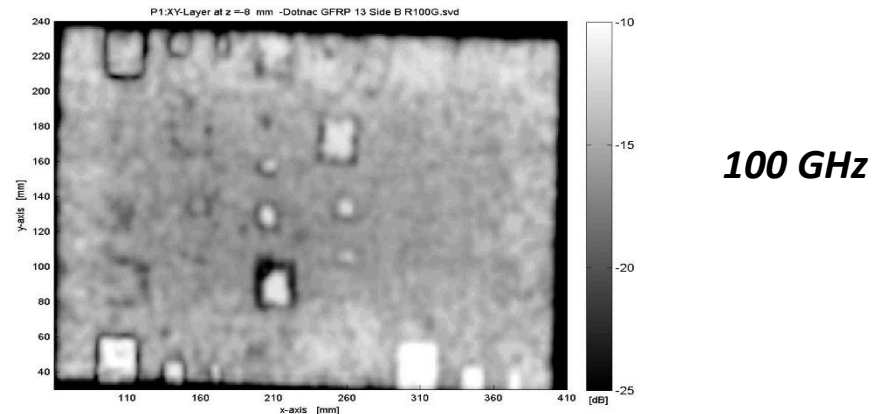
Terahertz FMCW system at 150 GHz



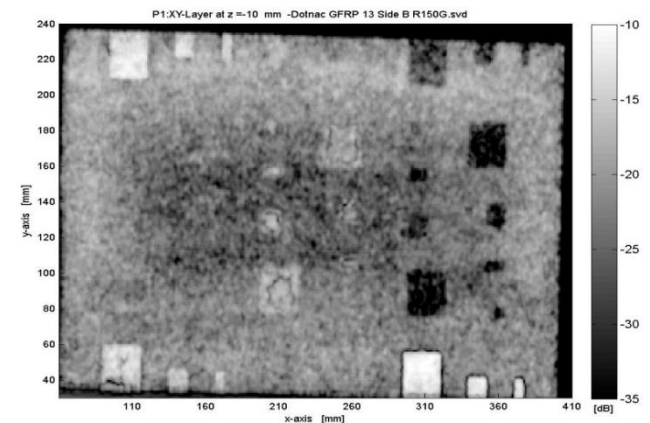
Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)
 - Exemples de résultats avec échantillons

GFRP C-SANDWICH ROHACELL WITH INSERTS



150 GHz

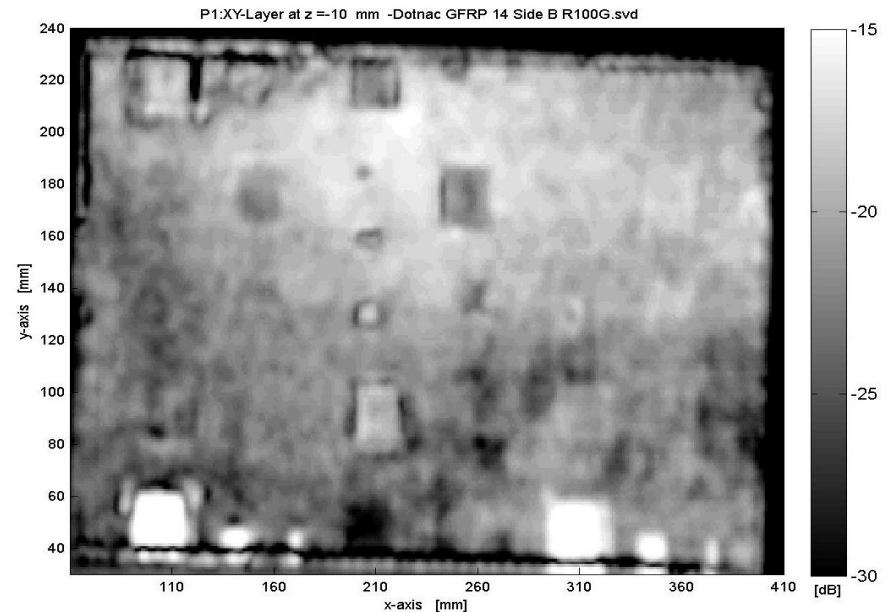


Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)
 - Exemples de résultats avec échantillons

GFRP C-SANDWICH HONEYCOMB WITH INSERTS

Terahertz FMCW system at 100 GHz

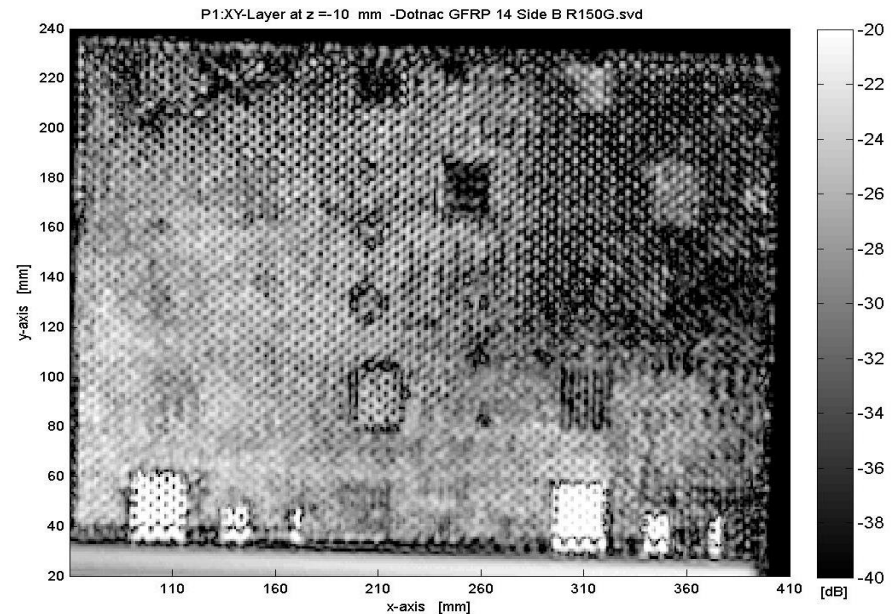


Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)
 - Exemples de résultats avec échantillons

GFRP C-SANDWICH HONEYCOMB WITH INSERTS

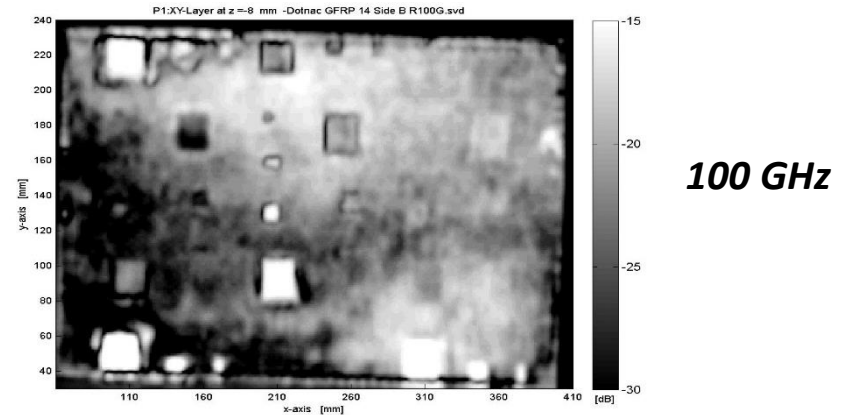
Terahertz FMCW system at 150 GHz



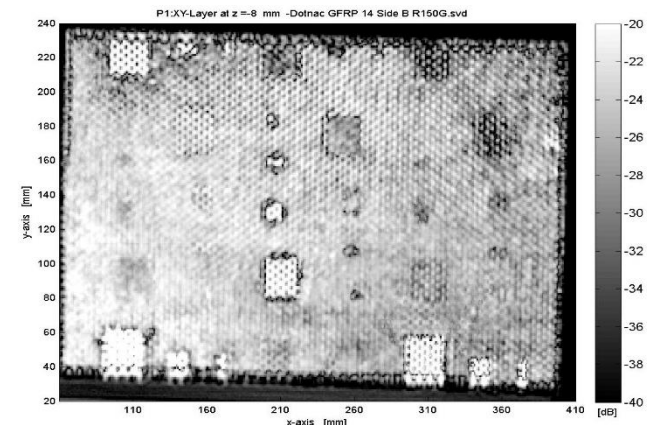
Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)
 - Exemples de résultats avec échantillons

GFRP C-SANDWICH HONEYCOMB WITH INSERTS



150 GHz



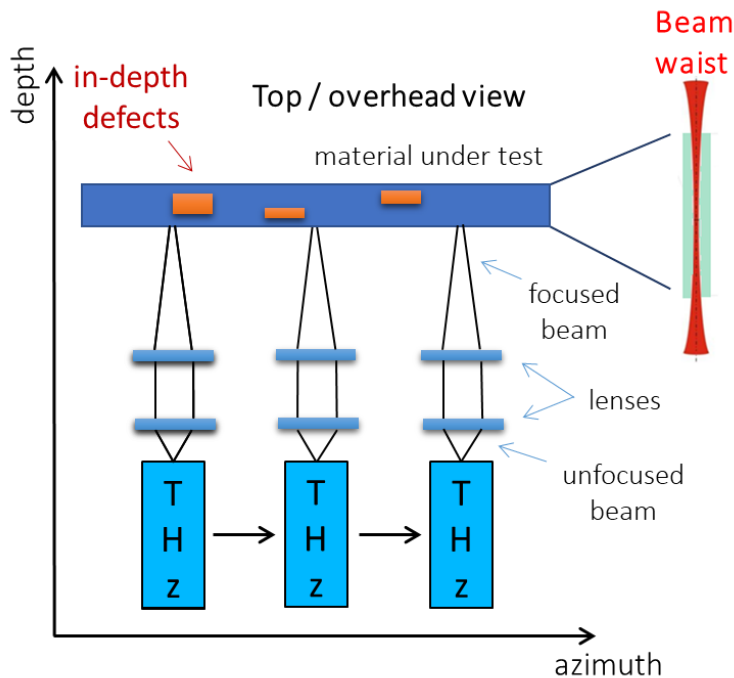
Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)

- Synthèse d'ouverture

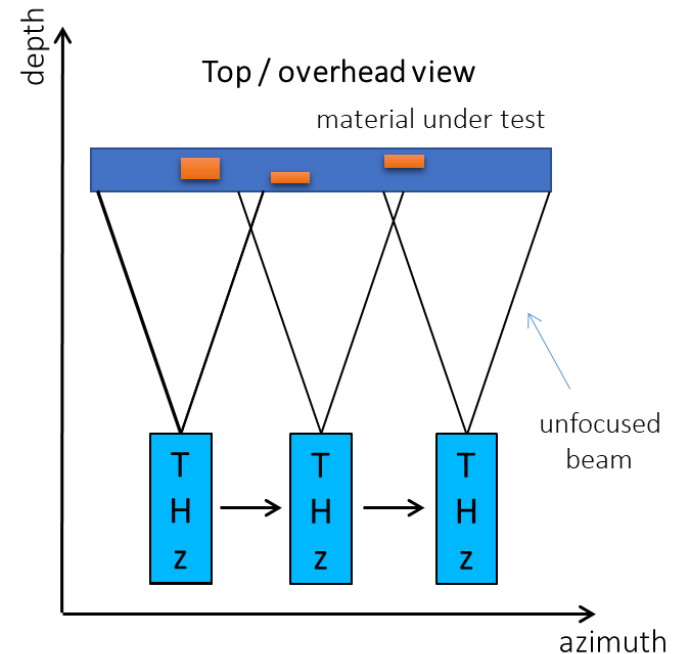


FMCW en mode focalisé



- Faisceau focalisé
- Etroitesse zone focalisation
- Limité par diffraction
- Résolution latérale: 1-3 mm

FMCW en mode synthèse d'ouverture *Synthetic Aperture (SA) FMCW*

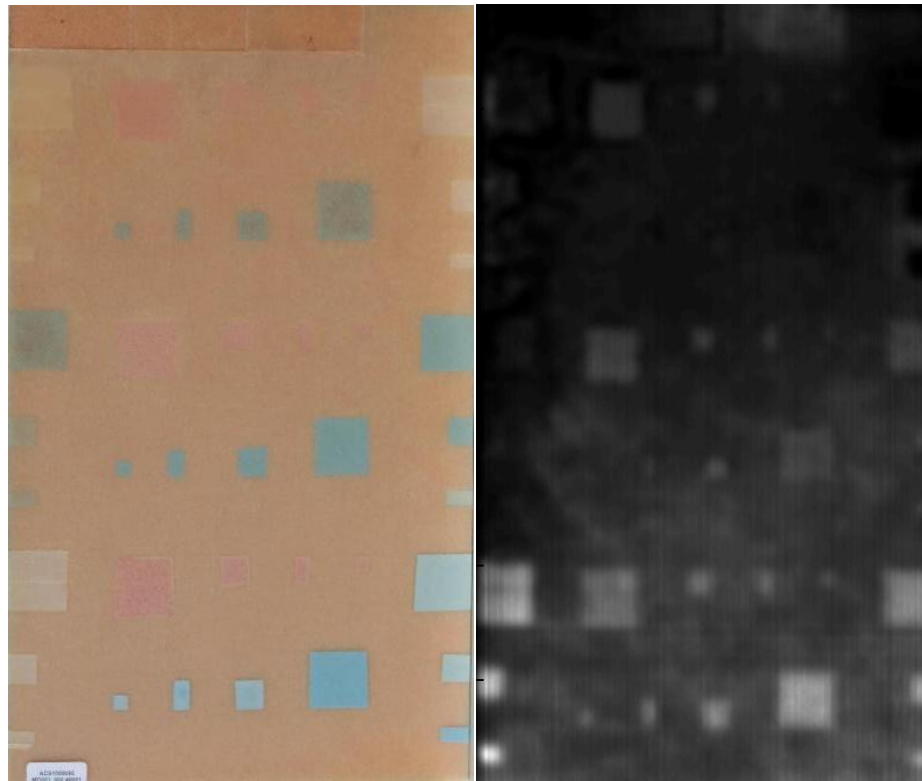


- Pas de lentille
- Faisceau non focalisé large (16°)
- Données refocalisées par software
- Résolution latérale: 4-7 mm

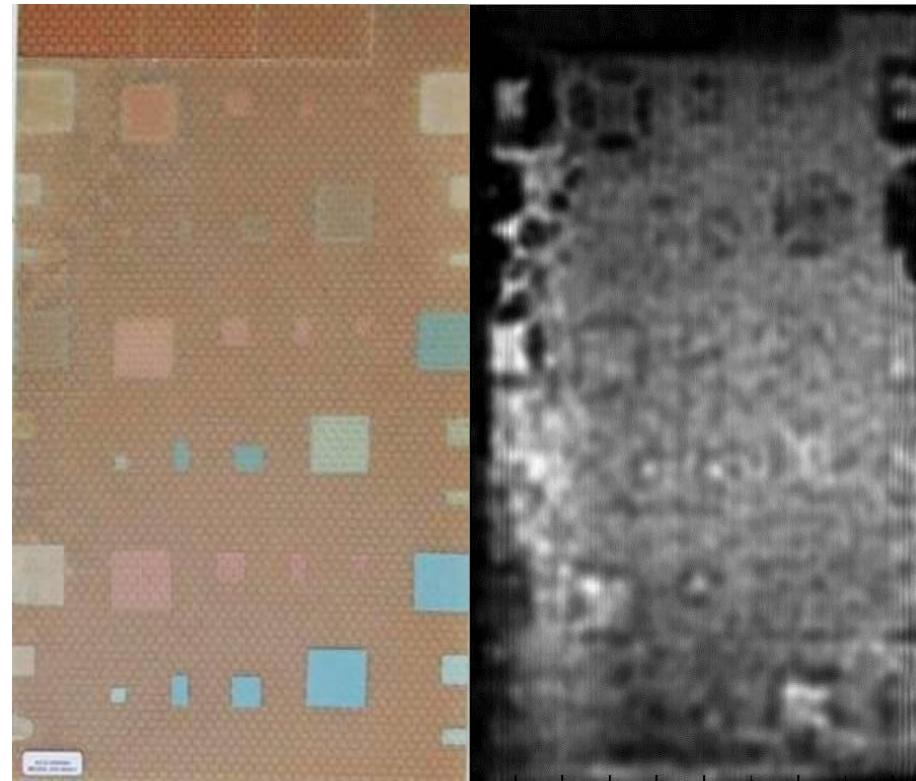
Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)
 - Synthèse d'ouverture

Rohacell core



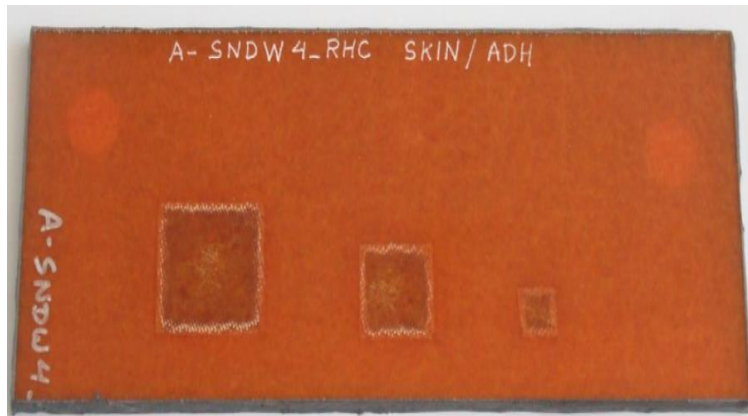
Honeycomb core



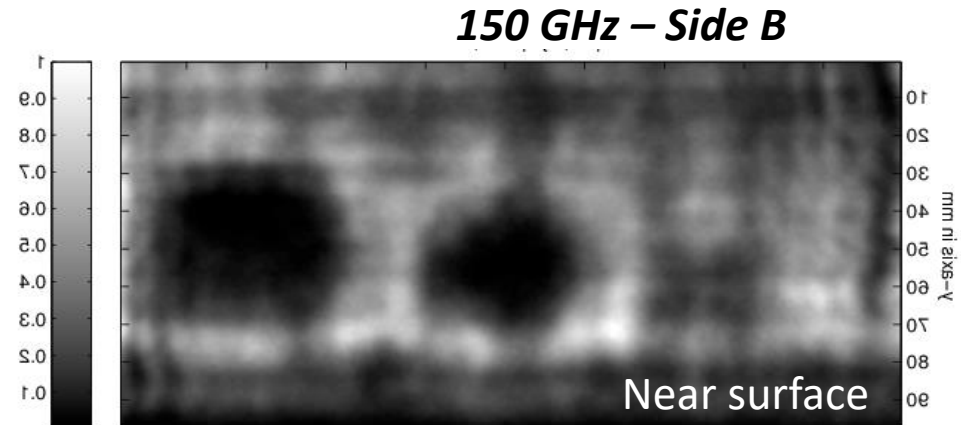
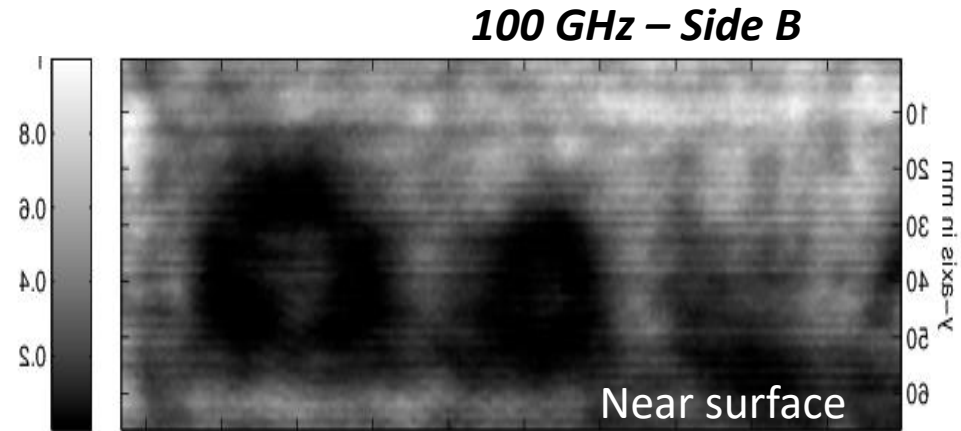
100 GHz – Side A

Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)
 - Synthèse d'ouverture: Résultats

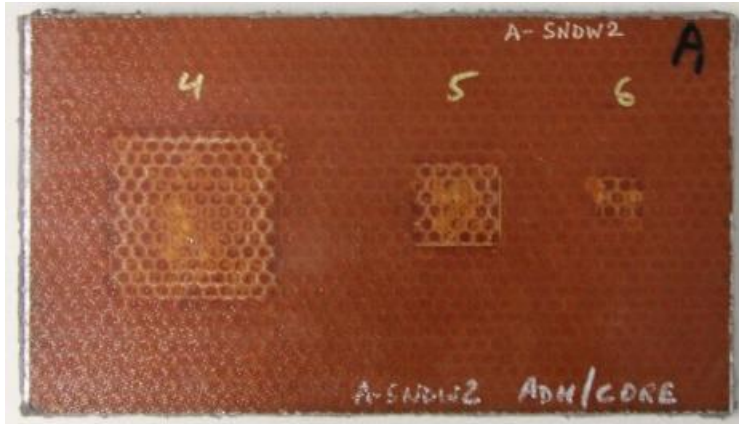


**A-Sandwich + Rohacell Core
Debonds**

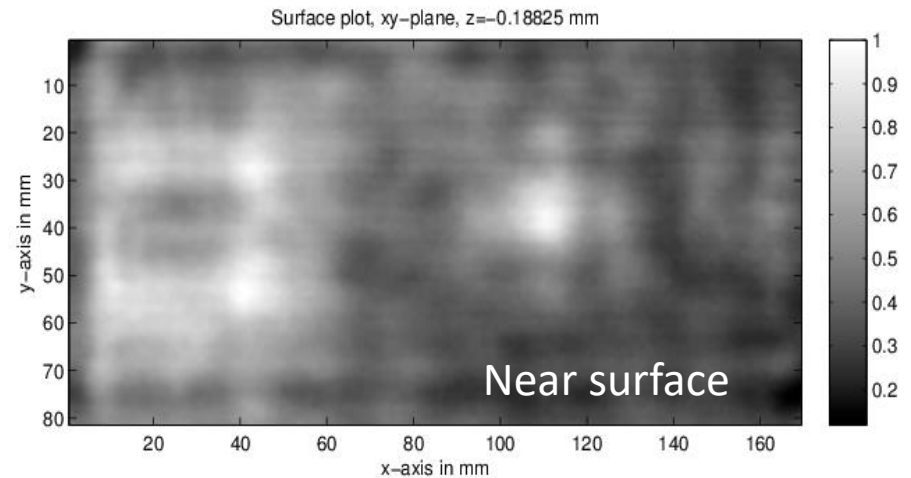


Imagerie THz pour le contrôle des composites

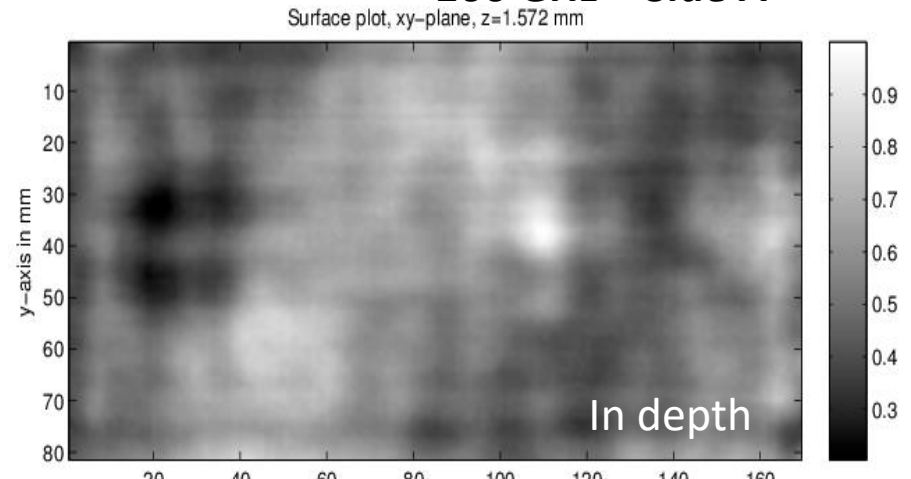
- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)
 - Synthèse d'ouverture: Résultats



100 GHz – Side A



100 GHz – Side A



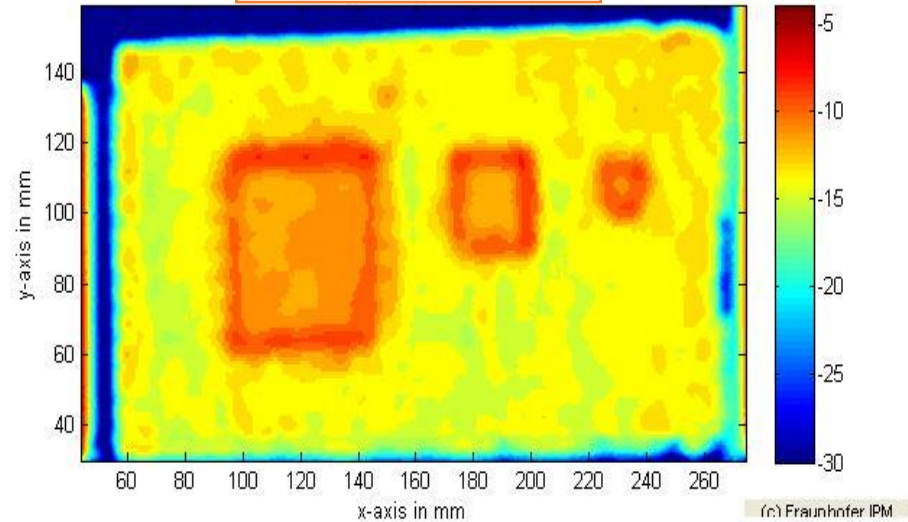
**A-Sandwich + Honeycomb Core
Debonds**

Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)
 - Synthèse d'ouverture: Résultats

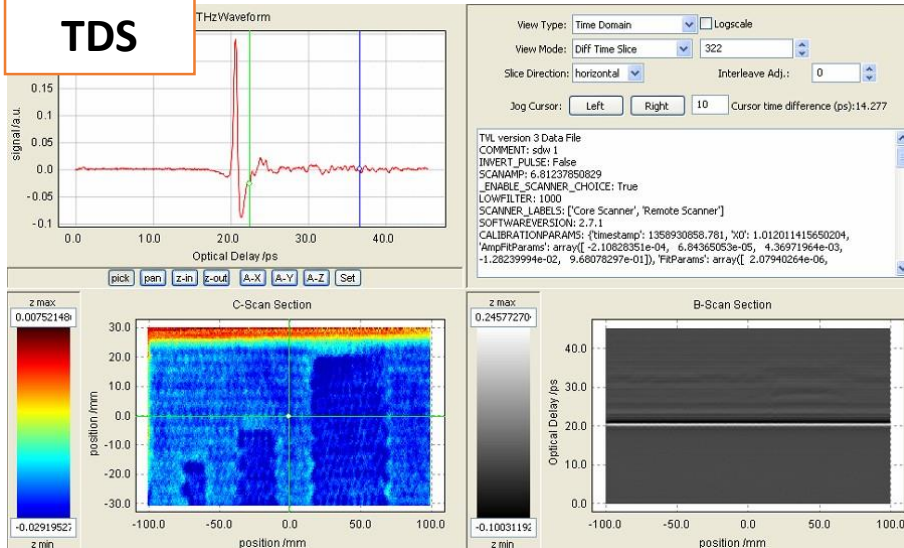


FMCW focalisé

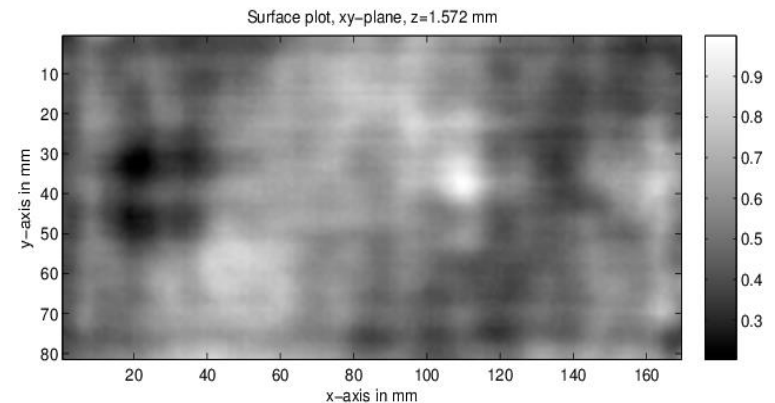


(c) Fraunhofer IPM

TDS



FMCW Synthèse ouverture



Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ Comparaison avec d'autres techniques d'inspection non destructives



	FMCW THz	IWEX	IRT	RT	TD THz	UT
IMPACT IN CFRP	0,40	0,80	0,80	0,60	0,80	1,00
IMPACT IN GFRP	0,75	1,00	1,00	0,00	0,75	1,00
WATER IN A-SAND FOAM	0,02	0,02	1,00	0,02	1,00	1,00
WATER IN A-SAND HONEYCOMB	1,00	0,67	1,00	1,00	0,33	1,00
WATER IN C-SAND FOAM	0,02	0,02	1,00	0,02	1,00	0,02
WATER IN C-SAND HONEYCOMB	1,00	0,02	1,00	1,00	1,00	0,67
TEFLON IN SOLID	1,00	1,00	1,00	0,00	0,67	1,00
TEFLON IN A-SAND FOAM	1,00	0,75	0,33	0,14	0,58	0,75
TEFLON IN A-SAND HONEYCOMB	0,92				0,75	1,00
TEFLON IN C-SAND FOAM	1,00				0,02	0,02
TEFLON IN C-SAND HONEYCOMB	0,92	0,00	0,00	0,33	0,02	1,00
STUCKS IN SOLID	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,00
STUCKS IN A-SAND FOAM	1,00	0,78	1,00	0,00	1,00	1,00
STUCKS IN A-SAND HONEYCOMB	1,00	0,78	1,00			1,00
STUCKS IN C-SAND FOAM	1,00	0,02	0,02			0,02
STUCKS IN C-SAND HONEYCOMB	1,00	0,02	0,02			1,00
PAPERS IN SOLID	1,00	1,00	1,00	0,14	0,86	1,00
PAPERS IN A-SAND FOAM	1,00	0,62				0,71
PAPERS IN A-SAND HONEYCOMB	1,00	0,29				1,00
PAPERS IN C-SAND FOAM	0,95	0,02				0,02
PAPERS IN C-SAND HONEYCOMB	1,00	0,02				1,00

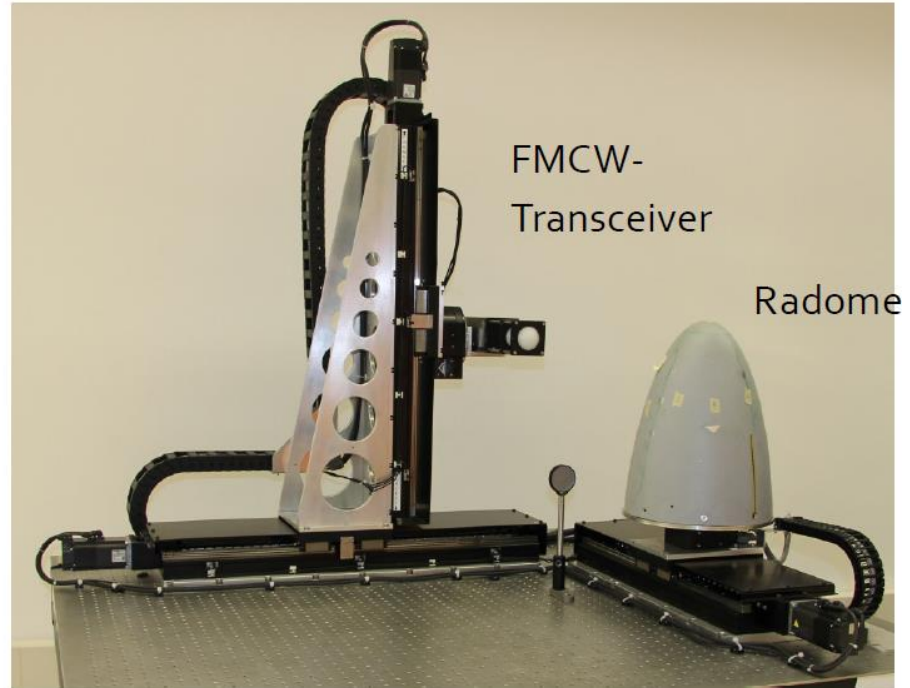
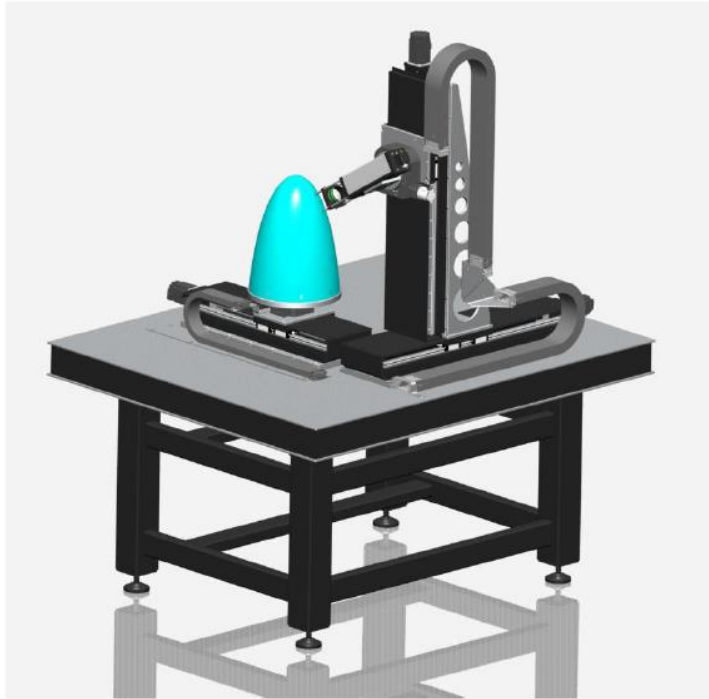
Good global detection of impact damage

Highest level of detection

Complementary techniques for detection of water

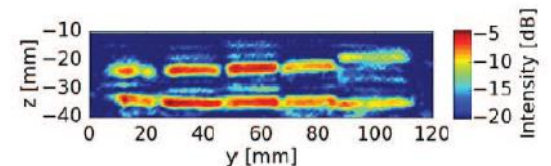
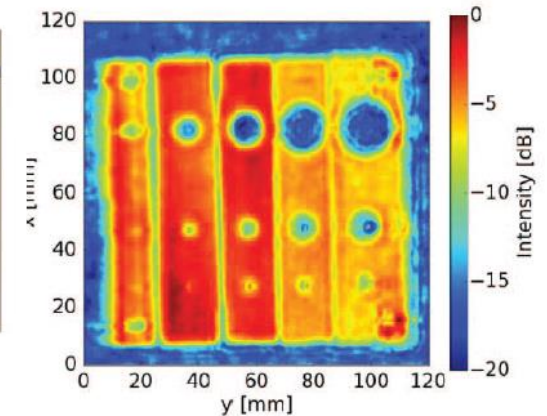
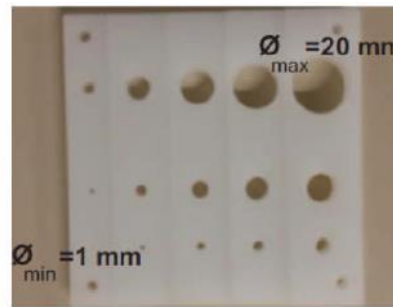
Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ Inspection de radome



Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)
 - Systèmes à l'état de l'art : FMCW en mode synthèse d'ouverture



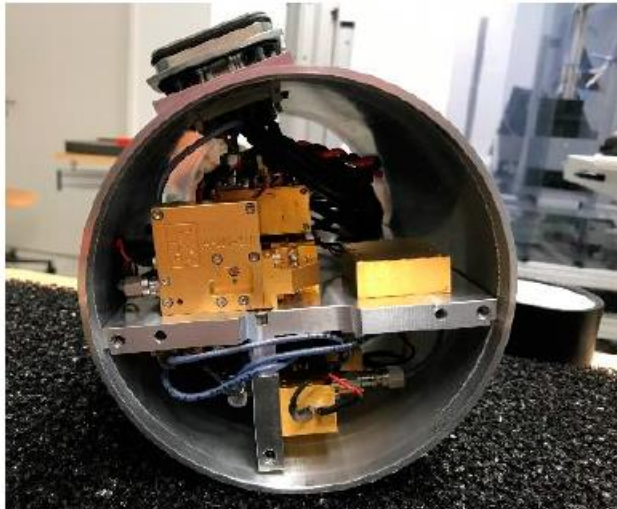
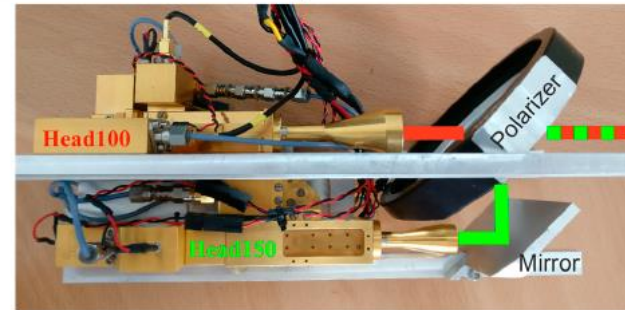
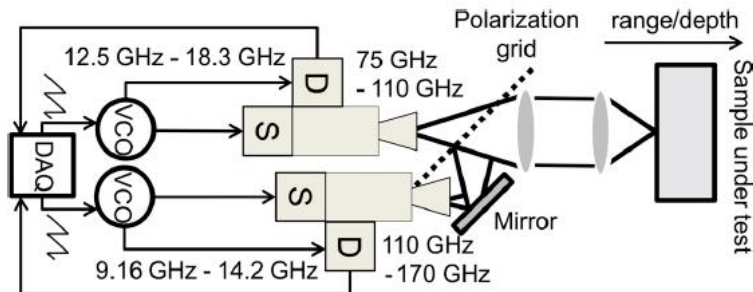
Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)

- Systèmes à l'état de l'art : FMCW en mode focalisé

F. Friedrich et al. "Terahertz radome inspection", Photonics 5, 1-11 (2018)

©  **Fraunhofer**
ITWM



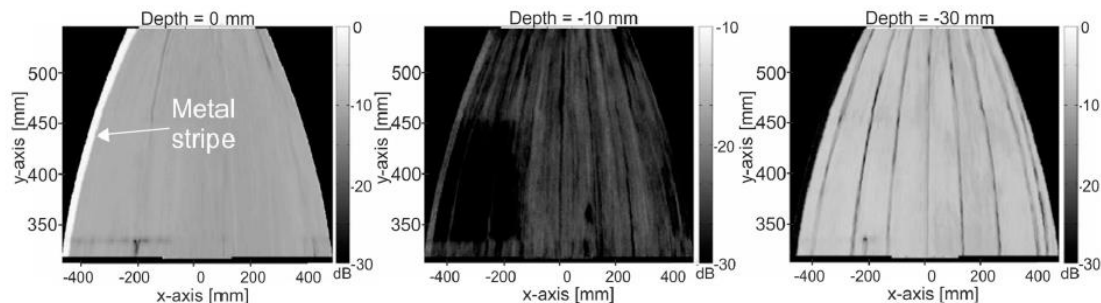
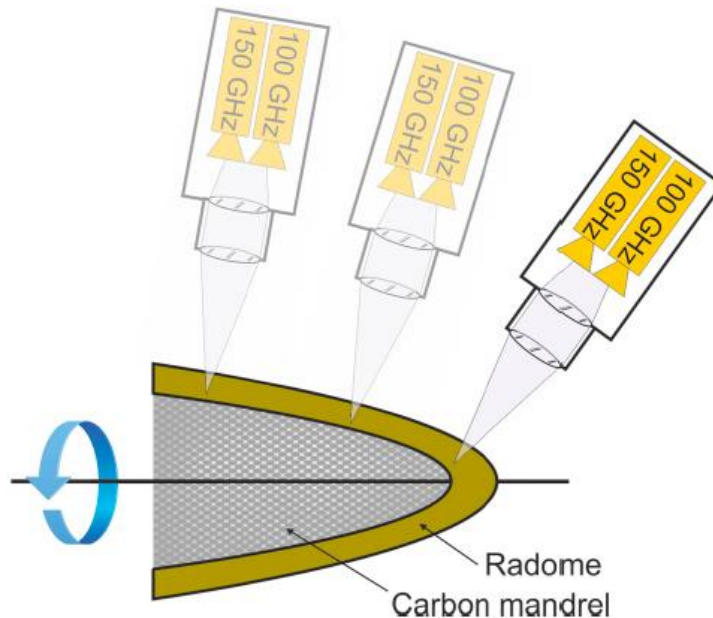
Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)

- Systèmes à l'état de l'art : FMCW en mode focalisé

F. Friedrich et al. "Terahertz radome inspection", Photonics 5, 1-11 (2018)

©  **Fraunhofer**
ITWM

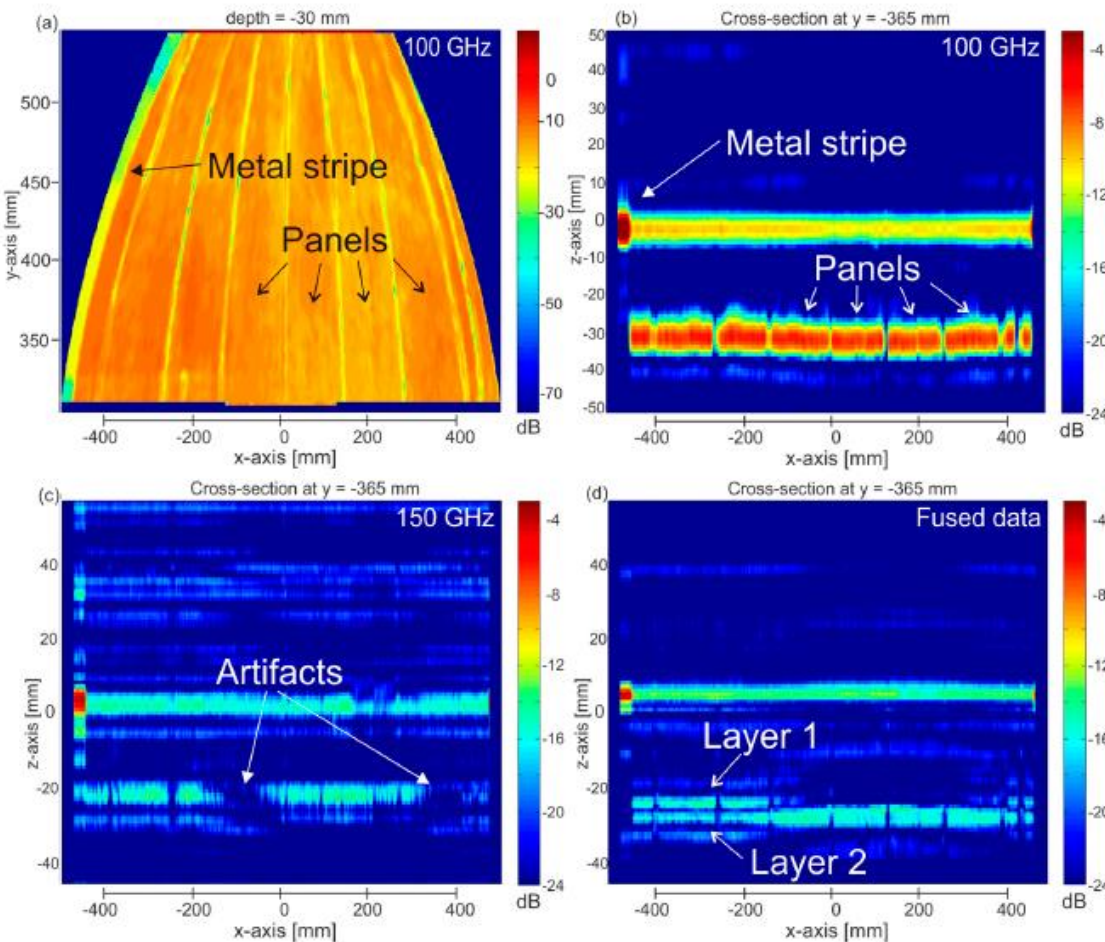


Imagerie THz pour le contrôle des composites

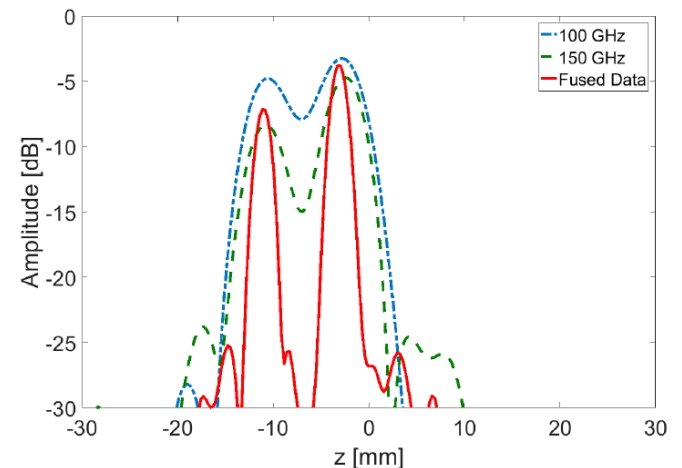
■ La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)

- Evolution des systèmes après projet DOTNAC

F. Friedrich et al. "Terahertz radome inspection", Photonics 5, 1-11 (2018)



**Projet: certification du système
Pour l'aéronautique**



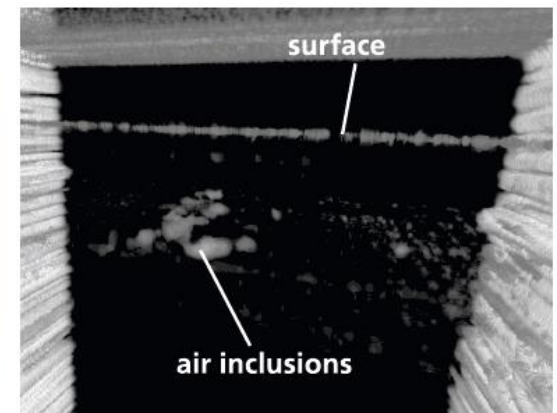
Imagerie THz pour le contrôle des composites

- La technique FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)
 - Systèmes à l'état de l'art : FMCW en mode focalisé



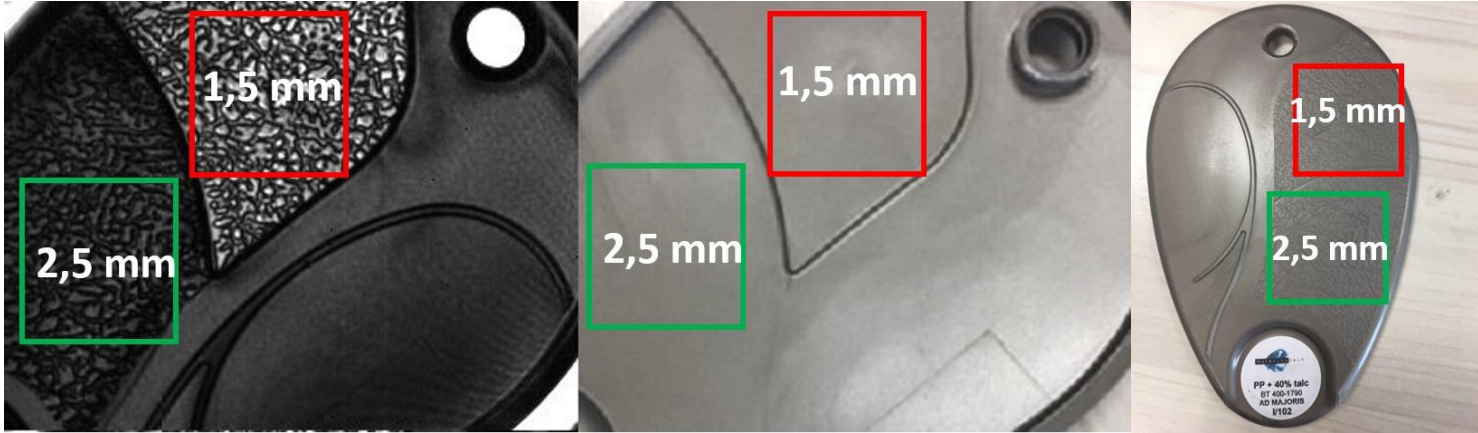
Mesure de coating/peinture pour l'industrie

Inspection de composites

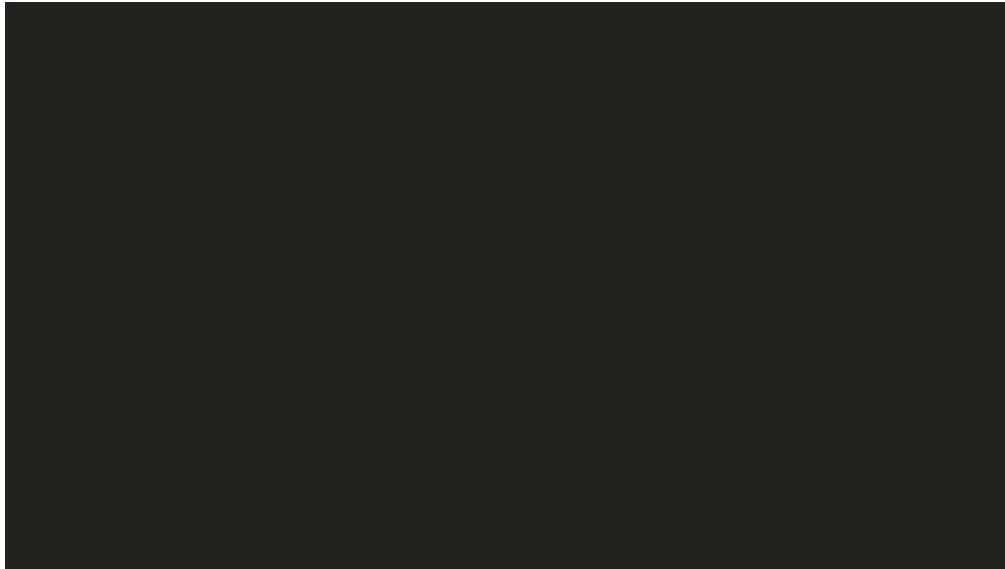


Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ Imagerie avec capteurs matriciels



i2S
innovative imaging solutions

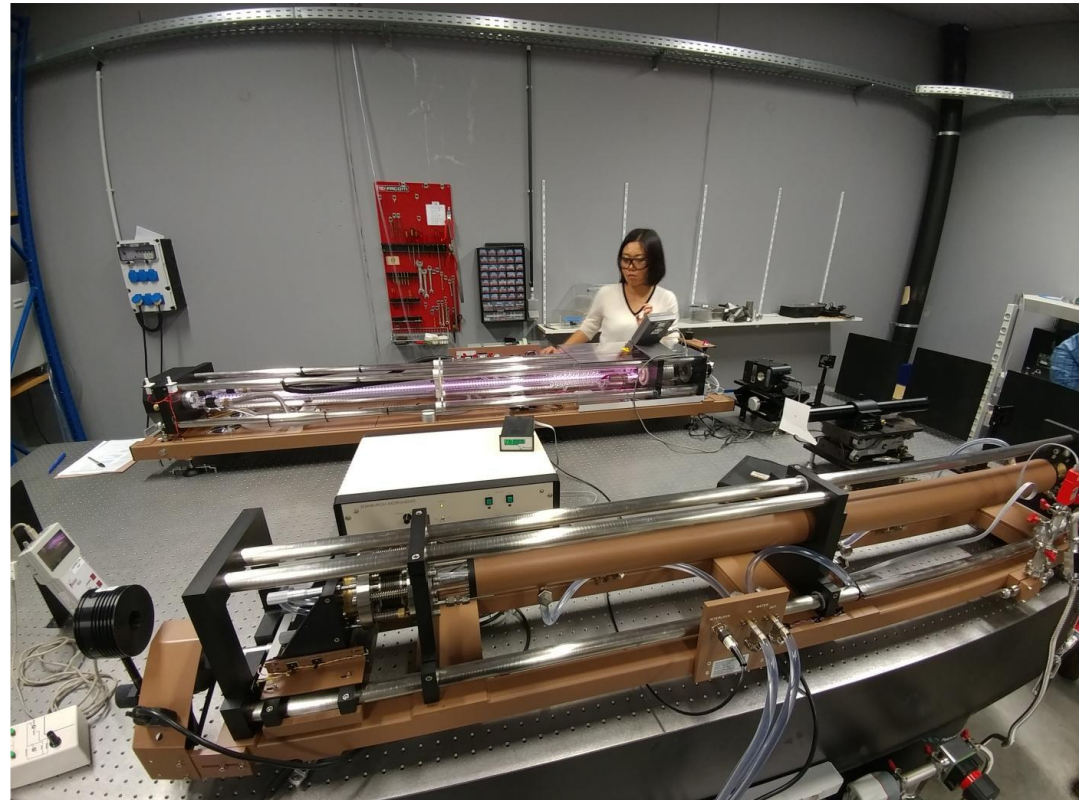


[Link to INO camera demo](#)

Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ Techniques holographiques avec capteurs matriciels

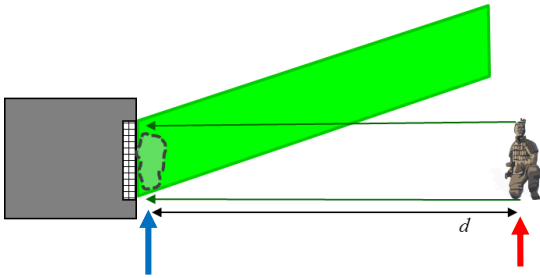
- Projet TERA4ALL
- Technique de base: holographie numérique



Imagerie THz pour le contrôle des composites

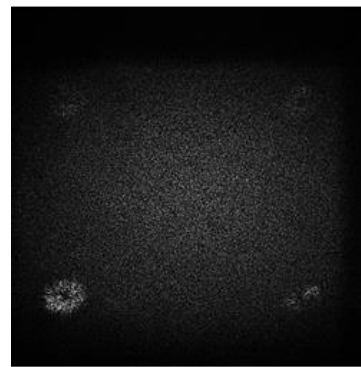
■ Techniques holographiques avec capteurs matriciels

- Projet TERA4ALL
- Technique de base: holographie numérique

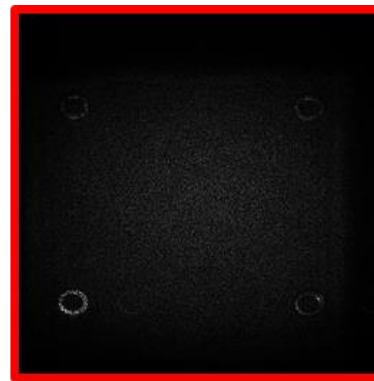


$$\underline{U_o(x, y, z = d)} = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \underline{I(\xi, \eta) U_R(\xi, \eta)} \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi + y\eta)\right] d\xi d\eta$$

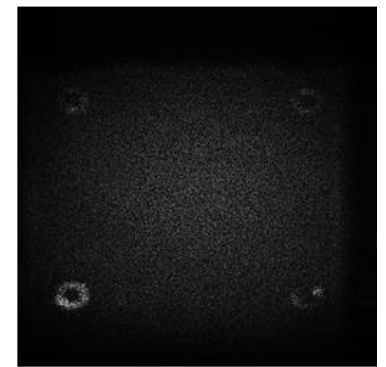
Amplitude de l'image reconstruite numériquement



z=80 cm Objet flou



*z=140 cm **Objet net***

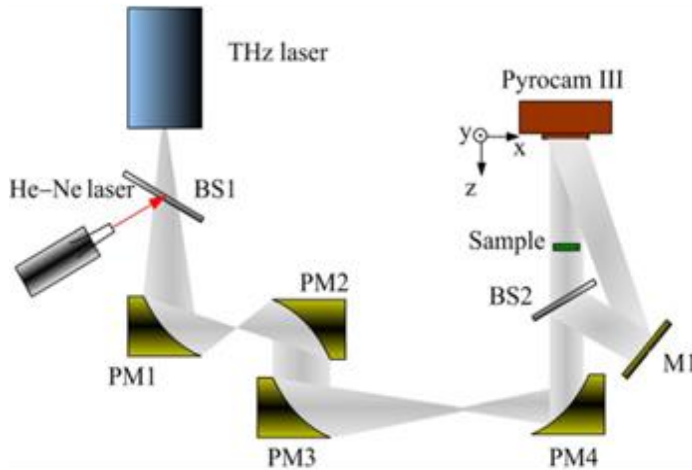


z=200 cm Objet flou

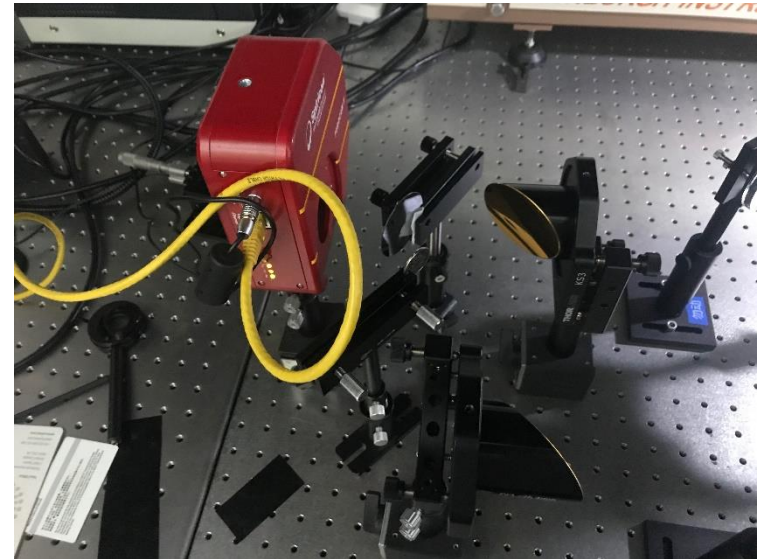
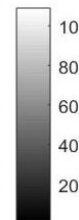
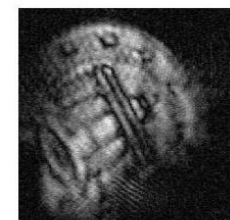
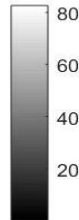
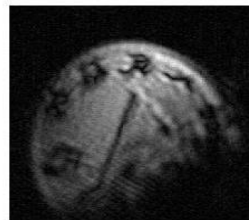
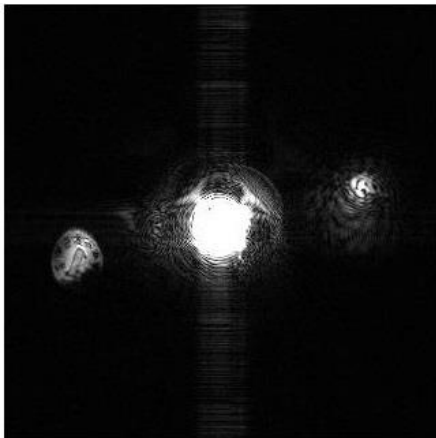
Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ Techniques holographiques avec capteurs matriciels

Configuration Hors-Axe



Amplitude de l'image reconstruite numériquement

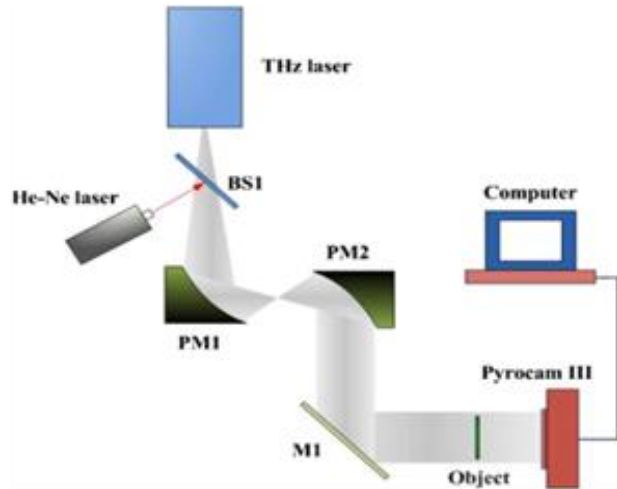


Set up THz digital holography
Beijing University of Technology
(prof. D. Wang)

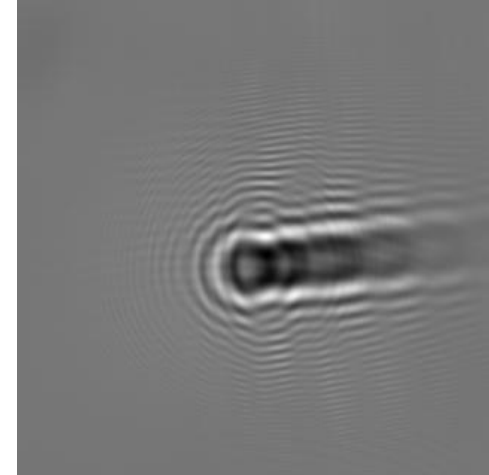
Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ Techniques holographiques avec capteurs matriciels

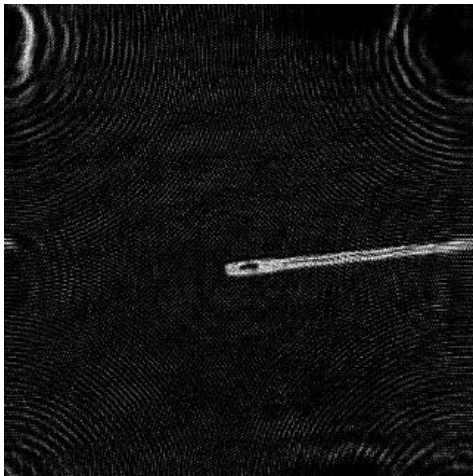
Configuration In-Line



Hologramme enregistré



Amplitude de l'image reconstruite numériquement



Phase de l'image reconstruite numériquement



Résolution latérale
200 μm

Possible:
35 μm

Imagerie THz pour le contrôle des composites

■ Techniques holographiques avec capteurs matriciels

- Tester fonctionnalités de l'holographie numérique
- Matériaux divers + composites
- Différentes fréquences/longueurs d'onde possibles avec laser
 - 2,5 THz - 118 μm (**haute puissance 500 mW - meilleure résolution possible**)
 - 0,69 THz/0,58 THz - 434 μm /516 μm (**50 mW – bonne pénétration composites**)
- Caméra INO (μ -bolomètres) : plus sensible que Pyrocam (env. 1000 x)
- Autres applications
 - Biomédical
 - Agroalimentaire
 - Textile
 - ...

Les partenaires de TERA4ALL sont ouverts à toute collaboration !!

Merci pour votre attention